



UNIVERSITAT D'ANDORRA

*Programa de doctorat de la Universitat d'Andorra*

# **La sostenibilitat de l'aigua a Andorra: efectes a llarg termini del canvi climàtic i socioeconòmic en el recurs hídric**

Cristina Pons Pesado

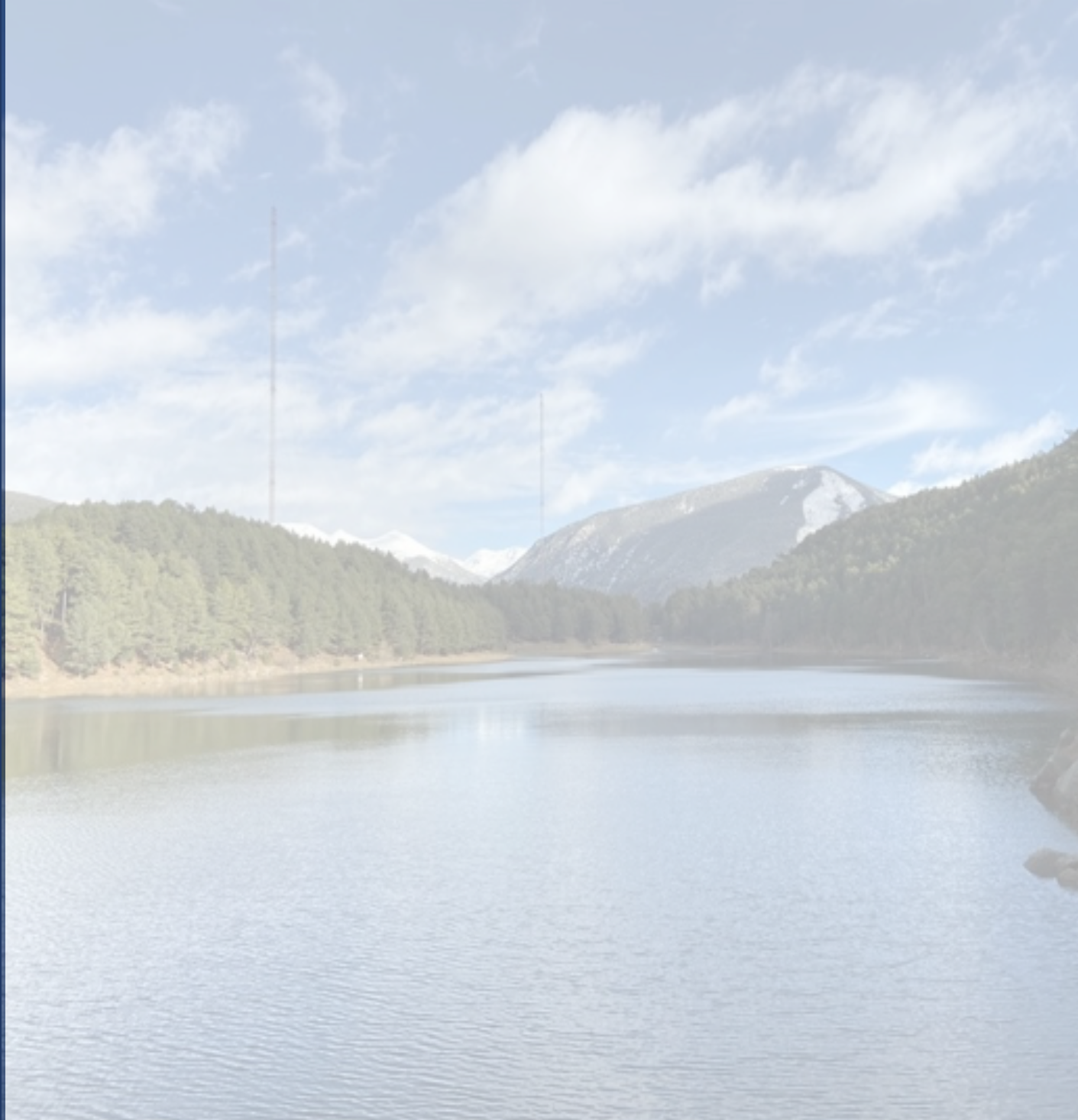
**Direcció:** Dr. Juan Ignacio López Moreno i Dr. Marc Pons Pons

**Identificador:** TD-079-107749/202103

**Data de defensa:** 15 de setembre de 2021

**ADVERTIMENT.** La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX ([www.tdx.cat](http://www.tdx.cat)) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (*framing*). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

**WARNING.** On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX ([www.tdx.cat](http://www.tdx.cat)) service has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized neither its spreading nor the availability from a site foreign to the TDX service. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service is not authorized (*framing*). These rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author



# **La sostenibilitat de l'aigua a Andorra: efectes a llarg termini del canvi climàtic i socioeconòmic en el recurs hídric**

Water sustainability in Andorra: Long-term effects of climate  
and socio-economic change on water resources

Cristina Pons Pesado



Directors:  
Dr. Juan Ignacio López Moreno (IPE-CSIC)  
Dr. Marc Pons (OBSA - CENMA)





Programa de doctorat de la Universitat d'Andorra

**La sostenibilitat de l'aigua a Andorra: efectes a llarg  
termini del canvi climàtic i socioeconòmic en el recurs  
hídric**

Water sustainability in Andorra: Long-term effects of climate and  
socio-economic change on water resources

Cristina Pons Pesado

Directors

Dr. Juan Ignacio López Moreno (IPE-CSIC)

Dr. Marc Pons (OBSA - CENMA)

29 de gener del 2021

# RESUM

---

El recurs hídric té un valor fonamental tant per als ecosistemes com per a la societat. No obstant, canvis en el clima, poblacionals, en el consum, d'usos del sòl i la urbanització n'afectaran la seva qualitat i disponibilitat futura. A Andorra, la confluència del canvi climàtic i un model socioeconòmic amb un pes important de la indústria turística basada en un ús intensiu de l'aigua podria comprometre la sostenibilitat futura del recurs hídric.

Aquesta recerca analitza el recurs hídric d'Andorra i la seva sostenibilitat futura mitjançant el model WEAP. Aquest model presenta una estimació inicial de la demanda nacional d'aigua segregada en els principals consumidors d'aigua del país i explora l'evolució futura del recurs hídric combinant escenaris climàtics i d'usos del sòl amb escenaris socioeconòmics (evolució de la població, del turisme, del consum i la producció de neu artificial).

Els resultats de les projeccions climàtiques i usos del sòl preveuen una variació del cabal mig anual d'entre -40,5 % i +24 % en funció del canvi projectat de temperatura (0°C, +2°C i +4°C) i precipitació (-20%, 0 i +20%). Aquesta disminució del cabal és més important durant la primavera i es detecta un avançament del pic de cabal de juny a maig degut a la fosa prematura de la coberta de neu. Pel cas dels escenaris d'usos del sòl, el seu impacte en la reducció del cabal és menor que l'efecte climàtic.

Es defineixen quatre escenaris socioeconòmics (Continuïtat, Decreixement, Futur creixement de la producció de neu artificial i Eficient) que s'han combinat amb els diferents escenaris de canvi climàtic i d'usos del sòl. Els resultats mostren que en termes generals i a escala de país l'impacte del canvi climàtic no comprometrà la demanda futura d'aigua. Tanmateix, quan analitzem les conques més petites del Valira del Nord i del Valira d'Orient observem que en algunes ubicacions i períodes determinats, es poden donar situacions crítiques i comprometre la capacitat de satisfer totes les demandes. Quan es considera un augment de la temperatura de 2 °C només s'observen situacions de conflicte en la Conca del Valira d'Orient pels escenaris de continuïtat i de futura producció de neu artificial durant el mes de gener. La resta d'escenaris on s'identifiquen conflictes entre la disponibilitat de recurs i la demanda d'aigua es donen amb un canvi en la temperatura més extrem de 4°C.

El model WEAP-Andorra es demostra com una eina útil per donar suport a la gestió, la presa de decisions i el disseny de polítiques de gestió sostenible de l'aigua i d'adaptació al canvi climàtic i que ens ha permès realitzar una sèrie de recomanacions i mesures d'adaptació per a Andorra.

*Paraules clau : Recurs hídric, Canvi Climàtic, Canvi Global, WEAP, Estratègies d'adaptació*

# ABSTRACT

---

Water resources have a fundamental value for both ecosystems and society. However, changes in climate, population, consumption, land use and urbanization are impacting its quality and future availability. In Andorra, the confluence of climate change and a socioeconomic model changes with an important weight of tourism industry based with an intensive use of water could threaten the future sustainability of water resources.

This research aims to explore water resources of Andorra and its long-term sustainability using the WEAP model. The WEAP-Andorra model presents an initial estimate of the national water demand segregated into the main water consumers of the country and explores the future evolution of water resources combining climatic and socioeconomic scenarios (evolution of the population, tourism, consumption and ski resorts snowmaking).

The results of climate projections and land uses predict a change in the average annual streamflow between -40.5 % and + 24 % based on the projected change in temperature (0 °C, + 2 °C and + 4 °C) and precipitation (-20 %, 0 and + 20 %). This decrease in streamflow is most significant during the spring with a shift of the streamflow peak from June to May due to premature melting of the snow cover. In the case of land use scenarios, their impact on flow reduction is less significant than the climatic effect.

Four socio-economic scenarios are defined (Business as Usual, Degrowth, Future growth of snowmaking and Efficient) to be combined with the different scenarios of climate change and land use. Results show that at country scale the impact of climate change will not compromise the future water demand. However, when we analyze the smaller basins of Valira del Nord and Valira d'Orient, we observe that in specific locations and periods it could be some challenges to achieve all the required demands. When a temperature increase of 2 °C is considered, only situations of potential conflict are observed in the Valira d'Orient Basin in the Business as Usual scenario and future snowmaking scenario during the month of January. All scenarios present conflicts between resource availability and water demand occur when a more extreme change in temperature of 4 °C is simulated.

The WEAP-Andorra model developed in this research shows to be a useful tool to support management, decision-making and the design of policies for sustainable water management and adaptation to climate change and has allowed us to propose recommendations and adaptation measures for Andorra.

*Key words: Water resource, Climate Change, Global Change, WEAP, Adaptation Strategies*

## AGRAÏMENTS

---

Primer de tot un agraïment especial pels meus directors, el Dr. J.I. López-Moreno i Dr. M. Pons, per la possibilitat de poder haver dut a terme aquesta recerca i per la vostra confiança, sense el vostre suport i coneixement, els vostres consells i orientació aquest projecte no hagués pogut existir.

Agradecerte Javi toda tu ayuda y disponibilidad, y compartir todos tus conocimientos, este modelo nos ha hecho bien sufrir!

Agrair també a l'Oriol, el meu company de l'OBSA que m'ha ajudat al llarg d'aquesta recerca de moltes maneres, gràcies per la paciència i el temps dedicat.

Voldria expressar el meu agraïment al Govern d'Andorra pel suport financer atorgat amb la beca (ATC017-AND-2017/2019). Agrair al ministeri de Medi Ambient del Govern d'Andorra i especialment al departament d'aigües i als diferents comuns per la informació i dades facilitades. Agrair a la Universitat d'Andorra i el seu personal que m'han proporcionat nous coneixements, habilitats i eines per realitzar la tesi.

I finalment m'agradaria agrair a totes aquelles persones sense les quals aquesta recerca no hagués arribat al seu fi, per tot el suport al llarg d'aquests anys i per estar sempre presents:

Gràcies Helena per ser la meva companya de beca i de tesi, per la teva simpatia i riures durant aquest procés, per continuar creient en les teves capacitats tot i els obstacles que has anat trobant, la pròxima ets tu! M'emporto una bona amiga!

A ma belle-famille, merci pour les mots de courage, pour croire toujours en moi et pour l'aide que vous me donnez même si on ne vous remercie jamais assez !

Sense oblidar l'Ester, Eli, Marta, Mariona i Natàlia, sort en tinc de vosaltres i d'aquestes sortidetes que alegren els dies, del vostre suport en tots els meus projectes i els ànims durant tot aquest viatge acadèmic!

Gràcies MAMA, sense tu això mai hagués estat possible, mil gràcies per tots els esforços que has fet perquè pugui arribar fins aquí. Eva, gràcies per estar sempre aquí, per la teva energia i alegria, per ser simplement tu.

A vosaltres, els meus amors incondicionals, gràcies per acompanyar-me en aquest viatge, per la paciència i per creure sempre en mi. Gràcies per tot el suport i per ajudar-me a afrontar l'estrès i la vida personal per a que aquest projecte arribi a terme. I a vosaltres, Pol i Noam per existir i donar-nos alegria i ganes de viure cada dia!



# INDEX

---

## **1. INTRODUCCIÓ**

1.1. Context actual	20
1.2. Canvi Global	24
1.2.1. El canvi global sobre el recurs hídric	27
1.3. Canvi Climàtic	31
1.3.1. Canvi climàtic global	31
1.3.2. Canvi climàtic als Pirineus	34
1.3.3. Canvi climàtic a Andorra	36
1.4. Recurs hídric i canvi climàtic	42
1.4.1. Recurs hídric i canvi climàtic a Andorra	44
1.5. Objectius de la tesi	47
1.5.1. Objectiu general	47
1.5.2. Objectius específics	47
1.6. Metodologia	48
1.6.1. Caracterització històrica del balanç hídric d'Andorra	49
1.6.2. Avaluació de les projeccions dels possibles impactes del canvi climàtic sobre el recurs hídric d'Andorra	49
1.6.3. Estudi històric de la demanda del recurs hídric a Andorra	50
1.6.4. Implementació d'un model integral d'avaluació del recurs hídric	51
1.6.5. Projecció de la futura evolució del recurs hídric a Andorra sota diferents escenaris de canvi global	52
1.6.6. Anàlisi i disseny de polítiques d'adaptació al canvi climàtic i gestió sostenible del recurs hídric per Andorra	55
1.7. Referències	56

## **2. CARACTERITZACIÓ HIDROLÒGICA A ANDORRA I LA SEVA**

### **TENDÈNCIA CLIMÀTICA**

2.1. Caracterització històrica del balanç hídric a Andorra	69
2.2. Caracterització històrica dels cabals observats	75
2.3. Anàlisi de tendències de cabals al Pirineu	81
2.3.1. Anàlisi de tendències de cabal a Andorra	88

2.4. Punts clau del capítol	93
2.5. Referències	94

### **3. PROJECCIÓ FUTURA DEL RECURS HÍDRIC A ANDORRA**

3.1. Model RHESSys	96
3.2. Modelització del recurs hídric a Andorra amb el model RHESSys	98
3.2.1. Àrea d'estudi	99
3.2.2. Dades climàtiques i hidrològiques	100
3.2.3. Escenaris de canvi climàtic i usos del sòl	102
3.2.4. Calibració i resultats	108
3.2.4.1. Calibració i validació del model	108
3.2.4.2. Resultats de les simulacions de canvi climàtic	109
3.2.4.3. Resultats de les simulacions combinades d'usos del sòl i climàtiques	111
3.3. Punts clau del capítol	114
3.4. Referències	115

### **4. CARACTERITZACIÓ DE LA DEMANDA D'AIGUA A ANDORRA**

4.1. Recurs hídric i model de gestió	119
4.1.1. Directiva Marc de l'Aigua (DMA)	119
4.1.2. Demanda d'aigua	123
4.1.2.1. Demanda d'aigua a Andorra	125
4.1.2.2. Caracterització històrica de la demanda d'aigua a Andorra	129
4.1.2.2.1. Dades de consum parroquials	131
4.1.3. Consum d'aigua en el turisme	133
4.2. Punts clau del capítol	140
4.3. Referències	140

### **5. MODELITZACIÓ INTEGRAL DEL RECURS HÍDRIC**

5.1. Gestió integrada del recurs hídric	145
5.2. Models d'avaluació integrada	147
5.3. Models d'avaluació integral del recurs hídric	148
5.3.1. El model AQUATOOL	150
5.3.2. El model MODSIM	151

5.3.3. El model RIBASIM (DELTARES)	152
5.3.4. El model MIKE BASIN	153
5.3.5. El model WARGI-SIM	154
5.3.6. El model WBaIMO	155
5.3.7. El model WEAP	156
5.4. Modelització Integral del cicle de l'aigua amb WEAP	160
5.5. Model WEAP-Andorra	167
5.5.1. Definició de l'àrea d'estudi	169
5.5.2. Anàlisi hidrològica	170
5.5.3. Demanda d'aigua	171
5.5.4. Calibració i validació del model	175
5.5.5. Creació d'escenaris	176
5.5.5.1. Escenari de referència	179
5.5.5.2. Escenari de Decreixement	180
5.5.5.3. Escenari de futur creixement de la producció de neu artificial	181
5.5.5.4. Escenari Eficient	182
5.5.5.5. Escenaris climàtics	183
5.5.6. Resultats del model WEAP-Andorra	184
5.5.6.1. Conca Gran Valira	184
5.5.6.1.1. Escenari de Referència	184
5.5.6.1.2. Escenari de Decreixement	186
5.5.6.1.3. Escenari de futur creixement de la producció de neu artificial	187
5.5.6.1.4. Escenari Eficient	189
5.5.6.2. Conca del Valira del Nord	192
5.5.6.2.1. Escenari de Referència	192
5.5.6.2.2. Escenari de Decreixement	194
5.5.6.2.3. Escenari de futur creixement de la producció de neu artificial	196
5.5.6.2.4. Escenari Eficient	198
5.5.6.3. Conca del Valira d'Orient	201
5.5.6.3.1. Escenari de Referència	201
5.5.6.3.2. Escenari de Decreixement	203
5.5.6.3.3. Escenari de futur creixement de la producció de neu artificial	206
5.5.6.3.4. Escenari Eficient	208

5.6. Punts clau del capítol	214
5.7. Referències	216

## **6. L'ADAPTACIÓ ALS IMPACTES DEL CANVI CLIMÀTIC EN EL RECURS HÍDRIC**

6.1. Adaptació al canvi climàtic	222
6.2. Adaptació als impactes del canvi climàtic en el recurs hídric a Andorra	224
6.2.1. Percepció de la població de la vulnerabilitat i les estratègies d'adaptació	224
6.3. Punts clau del capítol	236
6.4. Referències	237

## **7. DISCUSSIÓ I CONCLUSIONS**

7.1. Discussió	240
7.2. Conclusions	249
7.3. Futures línies de recerca i desenvolupament	252
7.4. Referències	255

<b>ANNEX 1. COMPLEMENT DE L'ANÀLISI DE TENDÈNCIES DE CABALS AL PIRINEU</b>	258
--	-----

<b>ANNEX 2. ENQUESTA RECURS HÍDRIC I ESTRATÈGIES D'ADAPTACIÓ AL CANVI CLIMÀTIC</b>	262
--	-----

<b>PUBLICACIONS I COMUNICACIÓ CIENTÍFICA</b>	265
--	-----



# FIGURES

---

## CAPÍTOL 1

---

Figura 1.1. Localització d'Andorra	20
Figura 1.2. Conques hidrogràfiques d'Andorra i estacions d'aforament	21
Figura 1.3. Mitjana de la precipitació mensual i temperatura màxima i mínima a Andorra durant el període 1950 – 2015	23
Figura 1.4. Augment de la concentració de CO <sub>2</sub> atmosfèric durant els últims 60 anys mesurat a l'Observatori de Mauna Loa, Hawaii	24
Figura 1.5. Temperatura mitjana anual de la superfície l'hemisferi Nord dels darrers mil anys	25
Figura 1.6. Taxa d'increment en moltes esferes de l'activitat humana durant els darrers 300 anys	26
Figura 1.7. Anomalies combinades de la temperatura de la superfície terrestre i oceànica de forma anual i global respecte a la mitjana del període 1986-2005.	31
Figura 1.8. Projeccions del canvi de la mitjana global de la temperatura superficial del 2006 al 2100 per diferents escenaris de l'IPCC	33
Figura 1.9. Anomalia de la temperatura mitjana anual a Andorra 1950-2015	37
Figura 1.10. Anomalia de la precipitació acumulada anual a Andorra des de 1950-2015	37
Figura 1.11. Projeccions de les emissions no absorbides de GEH pels diferents escenaris definits	39
Figura 1.12. Canvis projectats en la temperatura i precipitació	41
Figura 1.13. Diagrama de flux de treball de la tesi doctoral	48
Figura 1.14. Esquema de les dades d'entrada i sortida del model hidro-ecològic RHESSYS	50
Figura 1.15. Comparació entre la previsió futura d'un punt i la planificació d'escenaris	53
Figura 1.16. Comparació entre la planificació d'escenaris exploratius i la planificació d'escenaris normatius	53

## CAPÍTOL 2

---

Figura 2.1. Mapa de la situació de les estacions meteorològiques	71
Figura 2.2. Recurs hídic anual (hm <sup>3</sup> /any) pel Principat d'Andorra	73
Figura 2.3. Cabal (m <sup>3</sup> /s) del riu Valira del Nord i del riu Gran Valira a Borda Sabater	75
Figura 2.4. Mitjana del cabal (m <sup>3</sup> /s) del riu Valira del Nord	76
Figura 2.5. Mitjana del cabal (m <sup>3</sup> /s) del riu Gran Valira a Borda Sabater	76

Figura 2.6. Comparatiu entre cabals (m <sup>3</sup> /s) mensuals i precipitació per l'estació d'aforament del Pont d'Escaldes	78
Figura 2.7. Comparatiu entre cabals (m <sup>3</sup> /s) mensuals i precipitació per l'estació d'aforament de Borda Sabater	79
Figura 2.8. Exemple de representació dels resultats obtinguts a escala de Pirineus per als quartils q10, q25, q50, q75 i q90) per als períodes analitzats	82
Figura 2.9. Exemple de representació dels resultats obtinguts per a la estació d'aforament de Lavelanet (França) pel període 1970-2019	84
Figura 2.10. Situació de les estacions d'aforament i representació dels resultats de les tendències anuals per a les diferents estacions d'aforament pel període 2010-2018	86
Figura 2.11. Representació dels resultats de les tendències mensuals per a les diferents estacions d'aforament pel període 2010-2018	87

### **CAPÍTOL 3**

Figura 3.1. Jerarquia espacial del paisatge dins del model RHESSys	97
Figura 3.2. Estructura del model RHESSys : Entrades, sortides i pre-processament	98
Figura 3.3. Situació de l'estació d'aforament del Valira a la Seu d'Urgell	100
Figura 3.4. Distribució de les categories dels usos del sòl a Andorra	102
Figura 3.5. Evolució dels usos del sòl per l'escenari AFOR	105
Figura 3.6. Evolució dels usos del sòl per l'escenari FIREFOR	106
Figura 3.7. Evolució dels usos del sòl per l'escenari MANAGEFOR	107
Figura 3.8. Percentatge de tipus de sòl ocupat segons cada escenari	107
Figura 3.9. Cabal mensual simulat i observat després de la calibració dels paràmetres	108
Figura 3.10. Mitjana mensual del cabal del riu Valira per al període simulat 2002-2011 i pels escenaris t2p0 i t4p0	110
Figura 3.11. Mitjana mensual del cabal del riu Valira per al període simulat 2002-2011 i pels escenaris t2p-20 i t2p20	110
Figura 3.12. Mitjana mensual del cabal del riu Valira per al període simulat 2002-2011 i pels escenaris t4p-20 i t4p20	111
Figura 3.13. Mitjana mensual del cabal del riu Valira per al període simulat 2002-2011 i pels diferents escenaris d'usos del sòl	112
Figura 3.14. Variació (%) mensual del cabal dels diferents escenaris respecte el cabal simulat pel període 2002-2011	113
Figura 3.15. Variació (%) mensual del cabal dels diferents escenaris d'usos del sòl respecte el cabal simulat pel període 2002-2011	114

## CAPÍTOL 4

---

Figura 4.1. Distribució de la despesa hídrica	127
Figura 4.2. Despesa hídrica del Principat d'Andorra	128
Figura 4.3. Despesa domèstica del Principat d'Andorra	128
Figura 4.4. Despeses pels diferents sectors del Principat d'Andorra i recurs hídric Disponible	129
Figura 4.5. Consum i recurs hídric disponible (hm <sup>3</sup> /any) d'Andorra del 2010 al 2018	130
Figura 4.6. Consum d'aigua i recurs hídric disponible segons les estacions de l'any pel 2018 per Andorra	131
Figura 4.7. Evolució del consum parroquial del 2007 al 2018	131
Figura 4.8. Fotografies de les pistes d'esquí i dels canons de neu	134
Figura 4.9. Fotografia d'Andorra la Vella. Font: OBSA	137

## CAPÍTOL 5

---

Figura 5.1. Els tres pilars de la gestió integral de l'aigua	146
Figura 5.2. Interfície del programa WEAP	163
Figura 5.3. Conceptualització de processos hidrològics integrats i operacions de gestió de l'aigua amb el model WEAP	164
Figura 5.4. Estructura del model WEAP-Andorra	169
Figura 5.5. Esquema dels diferents rius definits en el model WEAP-Andorra	170
Figura 5.6. Nodes de demanda i enllaços pel model WEAP-Andorra	172
Figura 5.7. Diferència entre els consums domèstics facturats observats (Mm <sup>3</sup> /anuals) i dels consums simulats (Mm <sup>3</sup> /anuals) en el model WEAP pel 2016, 2017 i 2018	175
Figura 5.8. Diferència entre els consums domèstics facturats observats (%) i els consums simulats (%) en el model WEAP	176
Figura 5.9. Estructura i descripció dels escenaris al model WEAP-Andorra	177
Figura 5.10. Dades històriques i evolució futura de la població d'Andorra	180
Figura 5.11. Resultats de l'escenari de referència combinat amb els escenaris de canvi climàtic (+ 2 °C) i d'usos del sòl i el cabal del Gran Valira	185
Figura 5.12. Resultats de l'escenari de referència combinat amb els escenaris de canvi climàtic (+ 4 °C) i el cabal del Gran Valira	185
Figura 5.13. Resultats de l'escenari de decreixement combinat amb els escenaris de canvi climàtic (+ 2 °C) i el cabal del Gran Valira	186

Figura 5.14. Resultats de l'escenari de decreixement combinat amb els escenaris de canvi climàtic (+ 4 °C) i el cabal del Gran Valira	187
Figura 5.15. Resultats de l'escenari de futur creixement de la producció de neu artificial combinat amb els escenaris de canvi climàtic (+ 2 °C) i el cabal del Gran Valira	188
Figura 5.16. Resultats de l'escenari de futur creixement de la producció de neu artificial combinat amb escenaris de canvi climàtic (+ 4 °C) i el cabal del Gran Valira	188
Figura 5.17. Resultats de l'escenari eficient combinat amb els escenaris de canvi climàtic (+ 2 °C) i d'usos del sòl i el cabal del Gran Valira	189
Figura 5.18. Resultats de l'escenari eficient combinat amb els escenaris de canvi climàtic (+ 4 °C) i el cabal del Gran Valira	190
Figura 5.19. Resultats de l'escenari de referència combinat amb els escenaris de canvi climàtic (+ 2 °C) i d'usos del sòl i el cabal Valira del Nord	193
Figura 5.20. Resultats de l'escenari de referència combinat amb els escenaris de canvi climàtic (+ 4 °C) i el cabal del Valira del Nord	194
Figura 5.21. Resultats de l'escenari de decreixement combinat amb els escenaris de canvi climàtic (+ 2 °C) i el cabal del Valira del Nord	195
Figura 5.22. Resultats de l'escenari de decreixement combinat amb els escenaris de canvi climàtic (+ 4 °C) i el cabal del Valira del Nord	195
Figura 5.23. Resultats de l'escenari de futur creixement de la producció de neu artificial combinat amb els escenaris de canvi climàtic (+ 2 °C) i el cabal del Valira del Nord	197
Figura 5.24. Resultats de l'escenari de futur creixement de la producció de neu artificial combinat amb els escenaris de canvi climàtic (+ 4 °C) i el cabal del Valira del Nord	197
Figura 5.25. Resultats de l'escenari eficient combinat amb els escenaris de canvi climàtic (+ 2 °C) i d'usos del sòl i el cabal del Valira del Nord	199
Figura 5.26. Resultats de l'escenari eficient combinat amb els escenaris de canvi climàtic (+ 4 °C) i el cabal del Valira del Nord	199
Figura 5.27 Resultats de l'escenari de referència combinat amb els escenaris de canvi climàtic (+ 2 °C) i d'usos del sòl i el cabal del Valira d'Orient	202
Figura 5.28 Resultats de l'escenari de referència combinat amb els escenaris de canvi climàtic (+ 4 °C) i el cabal del Valira d'Orient	203
Figura 5.29. Resultats de l'escenari de decreixement combinat amb els escenaris de canvi climàtic (+ 2 °C) i el cabal del Valira d'Orient	205
Figura 5.30. Resultats de l'escenari de decreixement combinat amb els escenaris de canvi climàtic (+ 4 °C) i el cabal del Valira d'Orient	205
Figura 5.31. Resultats de l'escenari de futur creixement de la producció de neu artificial combinat amb els escenaris de canvi climàtic (+ 2 °C) i el cabal del Valira d'Orient	207



Figura 5.32. Resultats de l'escenari de futur creixement de la producció de neu artificial combinat amb els escenaris de canvi climàtic (+ 4 °C) i el cabal del Valira d'Orient	207
Figura 5.33. Resultats de l'escenari eficient combinat amb els escenaris de canvi climàtic (+ 2 °C) i d'usos del sòl i el cabal del Valira d'Orient	209
Figura 5.34. Resultats de l'escenari eficient combinat amb els escenaris de canvi climàtic (+ 4 °C) i el cabal del cabal del Valira d'Orient	209
Figura 5.35. Variació de la demanda i del cabal (en Mm3) segons els diferents escenaris a l'horitzó 2050 respecte el 2015 per la Conca del Gran Valira	211
Figura 5.36. Variació de la demanda i del cabal (en Mm3) segons els diferents escenaris a l'horitzó 2050 respecte el 2015 per la Conca del Valira del Nord	212
Figura 5.37. Variació de la demanda i del cabal (en Mm3) segons els diferents escenaris a l'horitzó 2050 respecte el 2015 per la Conca del Valira d'Orient	213

## **CAPÍTOL 6**

---

Figura 6.1. Edat i parròquia on viuen els enquestats	228
Figura 6.2. Percepció dels enquestats sobre el canvi climàtic	228
Figura 6.3. Percepció dels enquestats sobre les causes del canvi climàtic	228
Figura 6.4. Percepció dels enquestats dels efectes del canvi climàtic sobre el recurs hídic	229
Figura 6.5. Percepció dels enquestats sobre els usos de l'aigua a Andorra	229
Figura 6.6. Fotografies dels diferents usos de l'aigua a Andorra. Distribució de la despesa hídrica	231
Figura 6.7. Percepció dels enquestats sobre el preu de l'aigua a Andorra	231
Figura 6.8. Percepció dels enquestats sobre el preu del m3 d'aigua a Andorra	232
Figura 6.9. Comparatiu entre països dels costos del cicle de l'aigua	232
Figura 6.10. Percepció dels enquestats sobre els sectors a prioritzar en cas d'escassetat d'aigua	233
Figura 6.11. Percepció dels enquestats sobre les mesures d'adaptació al canvi climàtic	234
Figura 6.12. Percepció dels enquestats sobre les estratègies d'adaptació	235

# TAULES

---

## CAPÍTOL 1

---

Taula 1.1. Canvi previst de la temperatura mitjana global de la superfície i de la mitjana global del nivell del mar per a mitjans i finals del segle XXI	32
Taula 1.2. Característiques clau dels escenaris exploratius i normatius	54

## CAPÍTOL 2

---

Taula 2.1. Estacions meteorològiques d'Andorra utilitzades per l'anàlisi del balanç hídric	70
Taula 2.2. Resum balanç hídric anual en base al mètode de Thornthwaite	72
Taula 2.3. Dades de balanç hídric d'Andorra	73
Taula 2.4. Diferència entre els cabals aforats (2015) i la pluja estimada en la conca	74
Taula 2.5. Càlcul de correlació entre les variables precipitació i cabal per a l'estació d'aforament del Valira Nord al Pont d'Escaldes	80
Taula 2.6. Càlcul de correlació entre les variables precipitació i cabal per a l'estació d'aforament de Borda Sabater	81
Taula 2.7. Càlcul anual dels estadístics (període 2003-2018) per a l'estació d'aforament del Pont d'Escaldes	88
Taula 2.8. Càlcul anual dels estadístics (període 2010-2018) per a l'estació d'aforament de Borda Sabater	89
Taula 2.9. Anàlisi de tendències per l'estadístic "mitjana" per l'estació d'aforament d'Escaldes	90
Taula 2.10. Anàlisi de tendències per l'estadístic "mitjana" per a l'estació d'aforament de Borda Sabater	90

## CAPÍTOL 3

---

Taula 3.1. Dades disponibles de cabal, precipitació i temperatura	101
Taula 3.2. Escenaris de canvi en la temperatura mitjana i la precipitació anual utilitzats per forçar el model hidrològic	104
Taula 3.3. Resultats del cabal mig anual per l'horitzó 2050 segons els diferents escenaris de canvi climàtic respecte al cabal simulat (2002-2011) i la seva variació	109
Taula 3.4. Resultats del cabal mig anual segons els diferents escenaris de canvi d'usos del	

sòl respecte al cabal simulat (2002-2011) i la seva variació	112
--	-----

## **CAPÍTOL 4**

---

Taula 4.1. Recurs hídric disponible i consums d'aigua (hm <sup>3</sup> /anual) d'Andorra pel 2018	129
Taula 4.2. Consums d'Andorra pel 2018	130
Taula 4.3. Consum d'aigua trimestral a Canillo el 2014 (m <sup>3</sup> )	132
Taula 4.4. Consum d'aigua trimestral a Encamp el 2015 (m <sup>3</sup> )	132
Taula 4.5. Consum d'aigua trimestral al Pas de la Casa el 2015 (m <sup>3</sup> )	132
Taula 4.6. Consum d'aigua trimestral a Ordino el 2015 (m <sup>3</sup> )	132
Taula 4.7. Consum d'aigua trimestral a La Massana el 2015 (m <sup>3</sup> )	133
Taula 4.8. Consum d'aigua trimestral a Andorra la Vella el 2015 (m <sup>3</sup> )	133
Taula 4.9. Consum d'aigua trimestral a Sant Julià de Lòria el 2015 (m <sup>3</sup> )	133
Taula 4.10. Consum d'aigua trimestral a Escaldes-Engordany el 2015 (m <sup>3</sup> )	133

## **CAPÍTOL 5**

---

Taula 5.1. Característiques del model WEAP	156
Taula 5.2. Avantatges i inconvenients dels diferents models	158
Taula 5.3. Descripció de les dades i les fonts d'obtenció utilitzades per desenvolupar el model WEAP	168
Taula 5.4. Dades de cabals (m <sup>3</sup> /s) dels diferents rius definits en el model WEAP-Andorra pel 2015	171
Taula 5.5. Dades d'entrada de la demanda per l'any base requerides pel model WEAP Andorra	174
Taula 5.6. Característiques dels diferents escenaris socioeconòmics pel model WEAP Andorra	178
Taula 5.7. Característiques dels diferents escenaris climàtics pel model WEAP-Andorra	178
Taula 5.8. Característiques dels escenaris combinats d'usos del sòl i climàtics pel model WEAP-Andorra	178
Taula 5.9. Dades de demanda mensuals (Mm <sup>3</sup> ) segons els escenaris per la Conca Gran Valira i la variació (%) dels escenaris respecte la demanda del 2015-2016	191
Taula 5.10. Dades de demanda mensuals (Mm <sup>3</sup> ) segons els escenaris per la Conca Valira del Nord i la variació (%) dels escenaris respecte la demanda del 2015-2016	200
Taula 5.11. Dades de demanda mensuals (Mm <sup>3</sup> ) segons els escenaris per la Conca Valira d'Orient i la variació (%) dels escenaris respecte la demanda del 2015-2016	210

## CAPÍTOL 6

---

Taula 6.1. Impactes esperats per al sector de la gestió de l'aigua d'Andorra	225
Taula 6.2. Classificació i puntuació mitjana segons les respostes dels enquestats dels usos de l'aigua a Andorra	230
Taula 6.3. Classificació i puntuació mitjana segons les respostes dels enquestats sobre els sectors que s'haurien de prioritzar a l'accés	233



## **1. INTRODUCCIÓ**

---

### **1.1. Context actual**

### **1.2. Canvi Global**

#### **1.2.1. El canvi global sobre els recursos hídrics**

### **1.3. Canvi climàtic**

#### **1.3.1. Canvi climàtic global**

#### **1.3.2. Canvi climàtic als Pirineus**

#### **1.3.3. Canvi climàtic a Andorra**

### **1.4. Recurs hídric i canvi climàtic**

#### **1.4.1. Recurs hídric i canvi climàtic a Andorra**

### **1.5. Objectius de la tesi**

### **1.6. Metodologia**

### **1.7. Referències**

# 1. INTRODUCCIÓ

---

Els ecosistemes de muntanya han estat identificats com un dels ambients més fràgils i vulnerables del planeta (Diaz, Eischeid, Duncan i Bradley, 2003). En aquest sentit és important avançar en el coneixement de l'impacte que està tenint i tindrà el canvi climàtic en el recurs hídric, la biodiversitat o les activitats turístiques, i aconseguir una bona gestió. Diferents estudis valoren, a partir de projeccions climàtiques, l'exposició al canvi climàtic que tindran les zones de muntanya (Nogués-Bravo, Araújo, Errea i Martínez-Rica, 2007), però hi ha una mancança de treballs que abordin amb detall l'evolució recent del clima a partir de dades observades en estacions situades a altituds mitjanes i altes a causa de la dificultat de disposar de llargues sèries de dades (Esteban Veà, Prohom Duran i Aguilar, 2012; Pons et al., 2014).

En qualsevol estudi de canvi climàtic és imprescindible tenir un bon coneixement de l'evolució històrica del clima. Això pot ser una dificultat si fem referència a zones d'alta muntanya del Pirineu, on escassegen les sèries de dades i en major mesura les dades de qualitat. D'aquí la importància de projectes com el CLIMPY (Characterisation of the evolution of climate and provision of information for adaptation in the Pyrenees), que permetran tenir una visió general de l'evolució climàtica i les possibles projeccions futures del Pirineu (Llabrés-Brustenga, Prohom, Cunillera, Cuadrat, Serrano-notivoli i Saz, 2019).

Fins al moment s'han realitzat diversos estudis tant a nivell internacional com en el Pirineu (Beniston, 2012; García-Ruiz, López-Moreno, Vicente-Serrano, Lasanta-Martínez i Beguería, 2011a; López-Moreno, Vicente-Serrano et al., 2013; López-Moreno et al., 2014; Nogués-Bravo et al., 2007; Viviroli, Weingartner i Messerli, 2003) que analitzen els efectes del canvi climàtic en el recurs hídric en zones de muntanya. No obstant això, no existeix cap estudi científic que analitzi la influència del canvi climàtic en el recurs hídric a Andorra i ho relacioni amb els impactes socioeconòmics que pot generar.

En els Pirineus els models climàtics prediuen un augment notable de la temperatura d'1-2 °C per al període 2021-2050 i sota un escenari moderat d'emissions de gasos d'efecte hivernacle (A1B) (López-Moreno et al., 2014). L'evolució de la precipitació està subjecta a molta incertesa i variabilitat, però tots els models de la regió projecten una disminució

de la precipitació anual. S'espera també una reducció del 16 % del cabal associat a l'evolució de la coberta del sòl degut a l'abandonament dels cultius i pastures que evolucionaran a bosc (López-Moreno et al., 2014; García-Ruiz i Lana-Renault, 2011b). Tots aquests canvis projecten una disminució d'un 10-20 % del recurs hídric en diferents conques del Pirineu el 2050 respecte al període de referència 1970-2000 (Caballero et al., 2007; López-Moreno et al., 2014; Quintana-Seguí, Ribes, Martín, Habets i Boé, 2010). L'estudi de Zabalza-Martínez et al., 2017 revela que l'acció combinada dels canvis climàtics i d'ús del sòl poden tenir un efecte negatiu sobre el cabal mitjà anual (~ -30%) per al període 2012-2050. En aquesta línia és conegut que els processos de forestació redueixen la disponibilitat d'aigua [(López-Moreno et al., 2014; Warburton, Schulze i Jewitt, 2012; Weatherhead i Howden, 2009) i impliquen una intercepció de precipitació més gran per part de la vegetació i un augment de la infiltració d'aigua que disminueix el cabal superficial (Zabalza-Martínez et al., 2017).

D'altra banda i per tal de satisfer les necessitats d'aigua de la societat, la coberta del sòl i l'ús del sòl han canviat significativament. Aquests canvis afecten les respostes hidrològiques i, per tant, el recurs hídric disponible. El grau de modificació antròpica de la coberta del sòl, la intensitat dels canvis d'usos del sòl i la ubicació dels usos del sòl dins d'una conca determina la mesura en què els usos del sòl influeixen en la resposta hidrològica d'una conca (Warburton et al., 2012).

Per tant, la forta dependència del recurs hídric de muntanya a les fluctuacions en el clima però també en els usos del sòl afectarà la quantitat total i la distribució temporal del cabal i tindrà importants implicacions per a la gestió de l'aigua (López-Moreno, Beniston i García-Ruiz, 2008a).

El desenvolupament d'un model integral que vinculi els canvis ambientals amb el model socioeconòmic d'usos presenta no només un gran interès a nivell de planificació i desenvolupament de polítiques per a Andorra sinó també a nivell científic per a altres zones de muntanya. Sovint, els estudis científics aborden les dimensions del recurs o la demanda per separat, arribant a conclusions científiques parcials que dificulten la comprensió total de les dinàmiques futures. Un model integral permetria per una banda una millor comprensió dels impactes provocats per canvis físics i socioeconòmics sobre

el recurs a Andorra i d'altra banda podria servir de suport per al disseny d'estratègies de gestió més adequades i eficaces.

Aquesta recerca s'estructura de la següent manera: en primer lloc tenim la contextualització de la zona d'estudi, els objectius de la recerca i la metodologia utilitzada. El capítol dos presenta la caracterització hidrològica d'Andorra i les seves tendències climàtiques. El capítol tres se centra en la projecció futura del recurs hídric a Andorra a partir d'un model hidrològic tenint en compte canvis en el clima i en els usos del sòl. El capítol quatre caracteritza la demanda d'aigua i finalment els capítols 5 i 6 detallen la modelització integral del recurs hídric a Andorra i analitzen l'adaptació als impactes del canvi climàtic en el recurs hídric i es discuteixen els resultats per extreure'n les conclusions del treball.

### 1.1. Context actual

Andorra és un petit país als Pirineus entre Espanya i França (Figura 1.1). Té una superfície de 468 km<sup>2</sup> i una població de 77.543 habitants (Govern d'Andorra, 2020a).



Figura 1.1. Localització d'Andorra Font: elaboració pròpia

Andorra es troba en una regió muntanyosa formada per l'alta conca del Valira. Agrupa seixanta-cinc pics amb més de 2.500 m d'altitud, dels quals el Comapedrosa és el més alt amb 2.942 m.s.n.m (metres sobre el nivell del mar). Està representada per l'aflorament de materials paleozoics precarbonífers que han patit els efectes de l'orogènia herciniana



durant el Carbonífer, per posteriorment ser deformats per l'orogènia alpina en el Terciari (Govern d'Andorra, 2007). És una regió d'escarpats muntanyencs i de valls estretes per on flueixen nombrosos cursos d'aigua que s'uneixen per formar els tres rius principals (Figura 1.2). El Valira d'Orient té la capçalera en la part més oriental, té un recorregut de 23 km i passa per les poblacions de Canillo i Encamp, confluint amb el riu Valira del Nord, que té la capçalera als estanys de Tristaina, té un recorregut de 14 km i passa per les poblacions d'Ordino i la Massana. Finalment, a la ciutat d'Escaldes-Engordany, conflueixen ambdós rius per formar el Gran Valira, amb un recorregut d'11,6 km i un cabal anual mitjà de 13 m<sup>3</sup>/s. Aquest últim, en el seu descens cap al sud, acaba desembocant en el riu Segre a la Seu d'Urgell que, al seu torn, és afluent de l'Ebre.

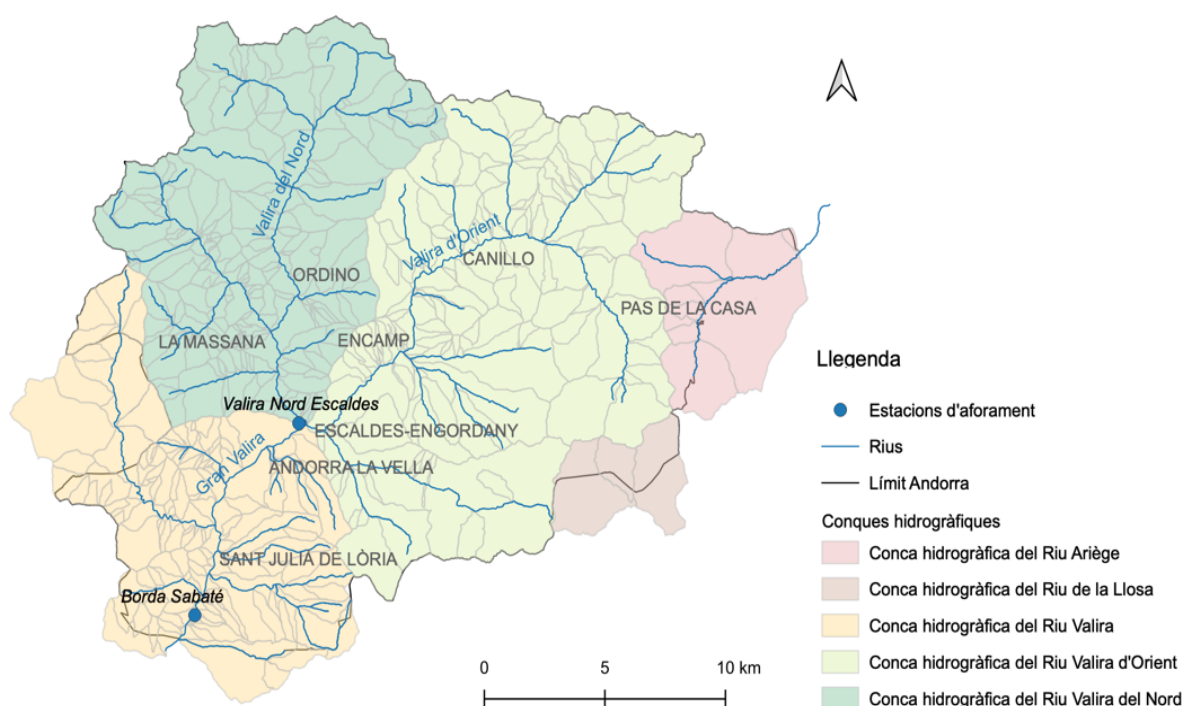


Figura 1.2. Conques hidrogràfiques d'Andorra i estacions d'aforament. Font: elaboració pròpia

Des d'un punt de vista climàtic Andorra té un clima mediterrani d'alta muntanya, d'acord amb les grans diferències d'altitud existents al país (Sant Julià de Lòria, el poble més baix, és a 940 m.s.n.m., i Soldeu, el més alt, a 1.825 m.s.n.m.). La diversitat de les formes de relleu, la diferent orientació de les valls i la irregularitat típica dels climes d'influència mediterrània fan que el país tingui una gran diversitat de microclimes, que

matisen el domini general del clima d'alta muntanya (Barceló Pons, 1995). Algunes influències continentals que introdueixen canvis en el típic règim estacional de precipitacions, l'altitud i localització de cara sud són clarament importants pel que fa al clima andorrà. No obstant això, la topografia de la part francesa dels Pirineus permet l'entrada de masses d'aire de l'Atlàntic nord i nord-oest, afectant especialment àrees d'elevades altituds i creant puntualment esdeveniments d'allaus extrems (Esteban, Jones, Martín-Vide i Mases, 2005).

A partir de les dades mensuals de temperatura màxima i mínima i precipitació facilitades per FEDA (Forces elèctriques d'Andorra) de tres estacions meteorològiques, Central, Engolasters i Ransol es calcula la mitjana per a tot el territori andorrà durant el període 1950-2015 (Figura 1.3). Si es calcula la mitjana anual s'obté una temperatura màxima i mínima mitjana de 12,7 i 3,1°C respectivament i una temperatura mitjana de 7,9°C i una precipitació mitjana de 66,8 mm.

El règim de temperatures i precipitació es caracteritza, a grans trets, per un estiu temperat i un hivern llarg i fred, d'acord amb la condició muntanyosa del Principat. Segons l'estudi del Govern d'Andorra (Govern d'Andorra, 2019a), la temperatura mitjana del país en el període 1971-2000 es quantifica en 5,8 °C. Al juliol (el mes més càlid) oscil·la entre els 18 i 20 °C a Andorra la Vella, i al gener (el mes més fred) prop dels 2 °C. Quant a les temperatures extremes, durant l'hivern no són excepcionals els valors negatius al voltant dels -2 °C. D'altra banda, les temperatures màximes superen fàcilment els 25 °C durant els mesos de juliol i agost (Batalla, Esteban i Ninyerola, 2016). La distribució mensual de les temperatures és gairebé idèntica en els vessants nord i sud, amb els mínims registrats coincidents al gener i els màxims al juliol o agost, seguint la pauta característica dels climes mediterranis.

En línies generals, les precipitacions es caracteritzen per pluges abundants durant la primavera i l'estiu, que poden perllongar-se fins a la tardor (maig, juny i agost solen ser els mesos més plujosos). Durant l'hivern, en canvi, és menys plujós, excepte en les parts altes, sotmeses a la influència de fronts procedents de l'Atlàntic, el que explica l'elevada innivació de les muntanyes andorranes. La precipitació mitjana anual del Principat d'Andorra en el període 1971-2000 és de 958 mm (Govern d'Andorra, 2019a).

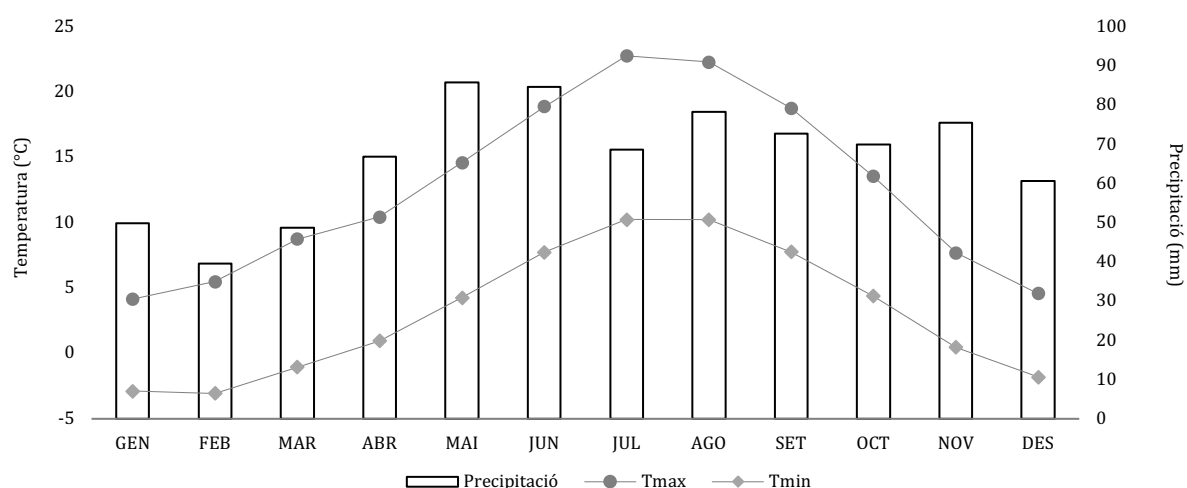


Figura 1.3. Mitjana de la precipitació mensual (barres) i temperatura màxima i mínima (línies) a Andorra durant el període 1950 - 2015. Font: Elaboració pròpia a partir de dades de les estacions meteorològiques de FEDA.

Es quantifica un recurs hídric mitjà anual disponible de 262 hm<sup>3</sup>/anuals en el període del 1971 al 2000. La variabilitat d'aquest recurs en l'any més sec es tradueix en una disminució del 45,7 %, mentre que l'any més humit s'incrementa el recurs en un 77,2 % (Govern d'Andorra, 2019a).

Pel que fa la demanda els usos de l'aigua són molt diferents i depenen de les activitats econòmiques desenvolupades en cada territori. Algunes zones consumeixen més aigua per a l'agricultura mentre que d'altres zones destinen l'aigua majoritàriament al consum del turisme, a la generació d'energia hidroelèctrica, o al consum domèstic, entre altres.

Les dades dels últims anys a Andorra xifren la despesa hídrica al voltant dels 90,15 hm<sup>3</sup>/any (2015). D'aquesta despesa es poden destacar la producció d'energia hidroelèctrica (82,6 %) i la producció d'aigua potable (12,1 %).

El consum mitjà urbà es quantifica en 211 litres/habitant/dia (2015) tenint en compte l'ús domèstic, l'hoteleria, els serveis en general i la indústria, entre d'altres (Govern d'Andorra, 2019a). En els capítols 2 i 4 s'aprofundirà amb més detall en l'anàlisi del recurs hídric i de la demanda a Andorra.

## 1.2. Canvi Global

El canvi global és un terme àmpliament utilitzat per descriure els efectes de les activitats humanes a la Terra. Tot i que el terme de vegades es refereix principalment al canvi climàtic global, s'han de considerar les interaccions entre els canvis naturals en l'estructura física i biològica de la Terra i els efectes més amplis de l'activitat humana. L'entorn global ha canviat constantment al llarg de la història de la Terra i encara seguiria canviant en absència d'éssers humans. En aquest sentit, el canvi global no és totalment producte de les accions humanes. Tot i així, hi ha una gran evidència que els humans han accelerat àmpliament el ritme i han introduït nombrosos tipus de canvis (National Research Council, 2000).

L'anàlisi del canvi global és complex. A dia d'avui s'han explorat molts aspectes del problema del canvi climàtic global mitjançant l'ús de models, experiments i observacions a escala mundial i en les darreres dècades ha augmentat la sofisticació d'aquestes anàlisis (National Research Council, 2000). Els orígens del concepte es deriven de la mesura minuciosa i constant de la concentració atmosfèrica de CO<sub>2</sub> a l'Observatori Mauna Loa de Hawaii (Keeling i Whorf, 2000; Keeling, Whorf, Wahlen, i Van der Plichtt, 1995). Aquestes observacions van demostrar per primera vegada que no hi ha dubte que les activitats humanes poden tenir conseqüències directes a escala mundial per al medi ambient (Figura 1.4) (Steffen et al., 2006).

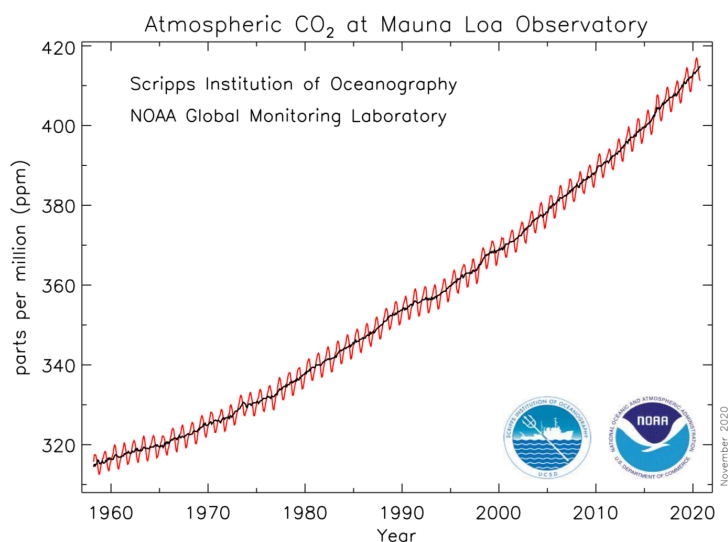


Figura 1.4. Augment de la concentració de CO<sub>2</sub> atmosfèric durant els últims 60 anys mesurat a l'Observatori de Mauna Loa, Hawaii. Font: NOAA, 2020



Un dels vectors de canvi global més significatiu és sens dubte el canvi climàtic. Si ens fixem en el passat més recent, s'estan acumulant proves que el clima de la Terra canvia ràpidament (Figura 1.5) i que les concentracions creixents de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> i altres gasos d'efecte hivernacle a causa de les activitats humanes són un factor causal important en aquest canvi i en la seva acceleració en les darreres dècades (Crowley, 2000; Mann, Bradley i Hughes, 1999; Smithson, 2001).

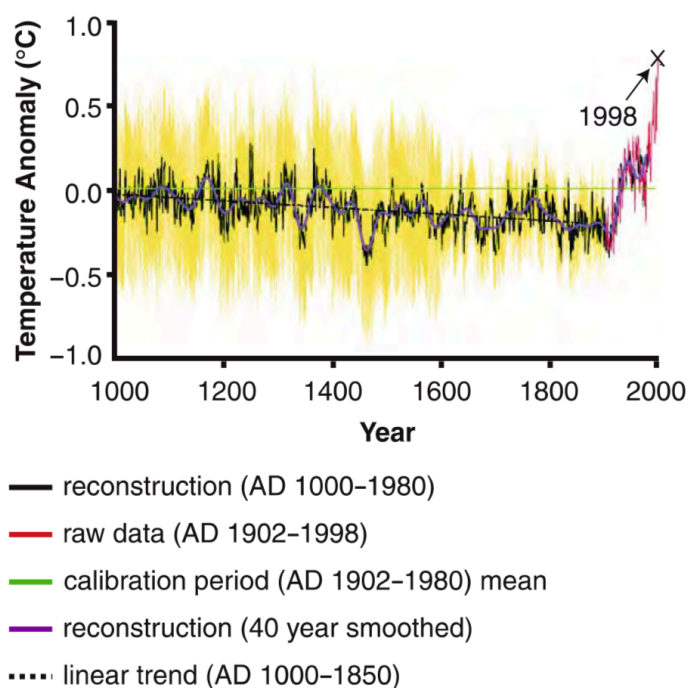


Figura 1.5. Temperatura mitjana anual de la superfície l'hemisferi Nord dels darrers mil anys Font: Mann et al., 1999

Els canvis en la relació entre la variabilitat natural i induïda per l'home que s'han produït durant els darrers segles i que estan donant lloc al canvi global són complexos. L'expansió de la humanitat, tant en nombre com en explotació per càpita dels recursos de la Terra, ha estat notable. Concomitant amb aquest augment de la població, la taxa de consum de recursos ha augmentat encara més. De la mateixa manera també existeixen altres canvis ràpids que afecten les societats humanes (Figura 1.6). Només durant els darrers 50 anys, l'augment de pràcticament totes les esferes de l'activitat humana ha estat considerable (l'augment de la població mundial, de l'economia, de la desigualtat econòmica, del consum de petroli, del nombre de vehicles de motor, de la comunicació global via Internet i de la urbanització entre d'altres).

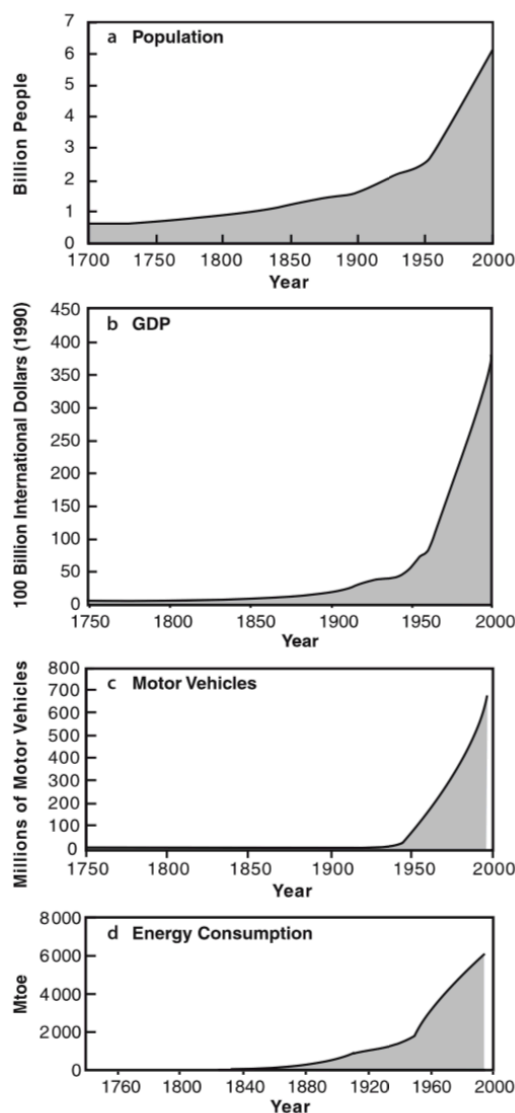


Figura 1.6. Taxa d'increment en moltes esferes de l'activitat humana durant els darrers 300 anys: **a** població. Font: Census, 2000; **b** economia mundial. Font: Nordhaus, 1997; **c** vehicles a motor. Font: UNEP, 2000; i **d** el consum d'energia. Font: Klein Goldewijk i Battjes, 1997

Per tant, la pressió sobre els recursos de la Terra i sobre la capacitat del planeta per assimilar els residus de l'augment de les activitats humanes s'intensifica bruscament (Crutzen, 2002; McNeill, 2001). Algunes de les conseqüències d'aquestes activitats humanes inclouen un esgotament de les reserves de petroli, una transformació de gairebé el 50 % de la superfície terrestre per l'acció humana directa, amb conseqüències importants per a la biodiversitat, el cicle de nutrients, l'estructura del sòl, la biologia del sòl i el clima (Daily, 1995; Vitousek, 1994), més fixació de nitrogen degut a la producció de fertilitzants, un augment substancial dels gasos d'efecte hivernacle a l'atmosfera, la pèrdua del 50 % dels ecosistemes mundials de manglars (aiguamolls costaners),

l'explotació de les poblacions de peixos marins i l'augment de les taxes d'extinció en els ecosistemes marins i terrestres.

Enumerar el conjunt ampli de canvis biofísics i socioeconòmics que s'està produint no aconsegueix captar la complexitat i la connectivitat del canvi global ja que no s'inclouen molts dels vincles i interaccions entre els canvis individuals. Per tant, és important estudiar a nivell local els problemes del canvi global per poder dur a terme una bona gestió i minimitzar les conseqüències futures ja que aquest canvi juga de maneres contrastades en diferents llocs, cadascun amb el seu propi conjunt de característiques.

L'entorn global i el fenomen del canvi global són heterogenis i la varietat de relacions entre l'home i l'entorn és àmplia. Per tant, per fer front o adaptar-se al canvi global es requereixen anàlisis que combinin les característiques particulars d'una ubicació o regió amb la naturalesa dels canvis a la totalitat del planeta i que les societats humanes aprenguin a conviure amb el canvi global.

### **1.2.1. El canvi global sobre el recurs hídric**

Les conseqüències del canvi global sobre el recurs hídric se solen considerar entre les més severes a què s'enfronten les societats humanes. Les activitats humanes tenen un impacte significatiu en el cicle hidrològic a escala mundial de moltes maneres. Pel que fa la vulnerabilitat humana actual a l'estrès hídric, tal com s'estima per la relació entre la demanda i la disponibilitat, es considera que més del 25 % de la població mundial està sotmesa a un estrès hídric sever (Vörösmarty i Sahagian, 2000).

La vulnerabilitat de les societats humanes davant el recurs hídric fortament variables o en declivi està estretament relacionada amb la necessitat d'augmentar la producció d'aliments. Al voltant del 70 % del recurs actual d'aigua del món s'utilitza per a l'agricultura, però aquest nombre s'acosta al 90 % en països com la Xina i l'Índia, que produeixen un reg intens. En altres parts del món, hi ha una competència creixent per l'aigua entre les necessitats humanes i ecològiques. Sigui quin sigui l'entorn socioeconòmic i cultural, el destí dels recursos d'aigua està determinat actualment per interaccions complexes entre el mercat, les preferències culturals, les dinàmiques

institucionals i polítiques regionals i internacionals. L'aigua no només és el fluid més important per a l'existència humana (i la d'altres formes de vida), sinó que també és important pel sistema terrestre mitjançant el funcionament del cicle hidrològic.

Els principals estudis sobre els efectes del canvi global sobre el recurs hídric (Kabat et al., 2004; McCarthy, Canziani, Leary, Dokken i White, 2001) se centren en tres aspectes crítics: els efectes potencials del canvi climàtic sobre la quantitat d'aigua, els impactes del canvi global sobre la qualitat de l'aigua i una anàlisi de vulnerabilitat del recurs hídric mundials.

El canvi climàtic és sense cap mena de dubte un dels vectors més importants de canvi global. L'estimació dels efectes del canvi climàtic sobre el recurs hídric futur és complexa i encara incerta. La majoria de les projeccions de canvis en la precipitació i l'escolament i, per tant, en última instància, la disponibilitat d'aigua per a usos humans, tenen encara en molts casos un alt nivell d'incertesa, superiors al de les projeccions de canvi de temperatura. Els escenaris suggereixen augments de les escorrenties a les altes latituds del nord i al sud-est asiàtic, però una disminució a l'Àsia central, la regió mediterrània, el sud d'Àfrica i Austràlia. Els efectes de la reducció del cabal i de la recàrrega d'aigües subterrànies afectarien milions de persones. En general, s'espera que centenars de milions de persones pateixin una reducció del subministrament d'aigua d'un 10 % o més el 2050 (McCarthy et al., 2001). Existeixen tres efectes potencials d'aquests canvis: una disminució del subministrament d'aigua, un augment d'esdeveniments extrems (inundacions i sequeres) i una amplificació dels impactes de la qualitat de l'aigua.

A més de la quantitat, el canvi climàtic també tindrà una influència sobre la qualitat de l'aigua (IPCC, 2014). S'espera que l'augment de la temperatura degradi la qualitat de l'aigua canviant la velocitat de reaccions de les quals depèn la qualitat de l'aigua (reaccions implicades en el procés d'eutrofització). Els esdeveniments extrems també tindran un paper crucial en la qualitat i la quantitat futures de l'aigua. Si els esdeveniments de pluges fortes esdevenen més intensos i freqüents, tal com es projecta en la majoria de simulacions del clima futur, hi hauran grans càrregues de sediments que tindran greus conseqüències per a la qualitat de l'aigua (Steffen et al., 2006).

D'altra banda, la vulnerabilitat dels humans a l'estrès hídric en les pròximes dècades estarà determinada per una combinació de factors, l'augment de la demanda a causa de l'augment de la població i de les activitats humanes i el canvi climàtic. Vörösmarty i Sahagian (2000) fan una anàlisi del canvi de recurs hídric basat en aquests dos factors a partir de la relació de la demanda agregada d'aigua (usos domèstics, industrials i agrícoles) amb el subministrament d'aigua. Per estimar l'estrès hídric futur utilitzen projeccions de creixement demogràfic i demanda d'aigua en les tres principals categories d'ús fins al 2025 juntament amb dos escenaris de canvi climàtic pel mateix període. L'estudi conclou que tot i que el canvi climàtic tindrà impactes discernibles sobre la disponibilitat d'aigua al 2025, és evident que aquests canvis es veuran desbordats per l'augment de la demanda de recurs hídric a causa del creixement de la població i de l'activitat econòmica.

A Catalunya, pròxim a l'àrea d'estudi, s'ha dut a terme el projecte *MEDACC* (Mediterranean Adaptation to Climate Change) (2013-2019) que ha estudiat com reduir la vulnerabilitat als impactes de canvi climàtic de tres conques catalanes (La Muga, el Ter i el Segre) i ha dissenyat, executat i monitoritzat diverses mesures d'adaptació. Aquest projecte ha dut a terme una sèrie d'accions per avaluar de quina manera l'adaptació pot reduir la vulnerabilitat de les conques al canvi climàtic. Aquestes accions són la anàlisi de les tendències en el clima, els usos del sòl, boscos i disponibilitat d'aigua durant les darreres dècades; l'estimació dels impactes de canvi climàtic i canvi global a l'horitzó 2050; el desenvolupament d'una metodologia basada en indicadors per avaluar el grau d'adaptació als impactes de canvi climàtic, la implantació de probes pilot per avaluar l'eficiència de les mesures d'adaptació dissenyades conjuntament amb actors locals; un pla d'acció per a l'adaptació al canvi climàtic que inclou l'avaluació de mesures prèvies i una proposta i avaluació de noves mesures; l'establiment i consolidació d'una xarxa d'actors locals i finalment un conjunt d'activitats de divulgació i comunicació.

Els principals resultats obtinguts per la conca de la Muga són una reducció del cabal de capçalera de fins al 48,9 % (1951-2013) com a conseqüència d'una menor precipitació a l'estiu i un increment de l'evapotranspiració anual. Els canvis en la coberta del sòl

mostren processos d'aforestació de fins al 20 %. La modelització d'aquesta zona preveu una reducció de cabals de la capçalera de fins al 21,7 % (2041-2050). Si la gestió forestal a capçalera reduís a la meitat l'actual densitat arbòria la reducció de cabals seria del 10 %. Els resultats assenyalen que no existeix cap gestió que permeti garantir les demandes futures i el compliment dels cabals i que cal centrar l'esforç en reduir les demandes i millorar l'eficiència del cicle de l'aigua mitjançant la recarrega dels aquífers locals. També cal una gestió forestal a la capçalera. Aquestes accions a emprendre han de ser discutides i acordades pels actors locals.

Aquest projecte considera diferents alternatives de gestió del paisatge per millorar la resistència i la resiliència a la muntanya contra el canvi global, tenint en compte la seva viabilitat ecològica i socioeconòmica. Promou pràctiques de gestió forestal i desenvolupament agrícola. Aquestes alternatives aborden d'una manera holística la innovació i el renaixement rural per fomentar la silvicultura i l'agricultura com una forma d'adaptar-se al canvi climàtic, millorant la resiliència de tot el sistema socioecològic assegurant actius clau, com ara l'aigua, el sòl i la biodiversitat: reduint la vulnerabilitat de tot el sistema als incendis forestals, ii) gestionant el bosc de manera sostenible, iii) millorant les oportunitats econòmiques de les zones marginals i iv) aturant la pèrdua de biodiversitat.

En conclusió, el canvi global és molt més que el canvi climàtic. Les activitats humanes influeixen de manera significativa en el funcionament del sistema terrestre de moltes maneres. Per tant, el canvi global no es pot entendre en termes d'un simple paradigma causa-efecte. Els efectes en cascada de les activitats humanes interactuen entre si i amb els canvis a escala local i regional de formes multidimensionals. Per tant, és important analitzar els canvis a escala local, ja que cada territori té les seves característiques específiques tenint en compte com el canvi climàtic afectarà el recurs hídric però també els canvis a nivell socioeconòmic (canvis en la població que afectaran la demanda d'aigua, canvis en els patrons d'usos del sòl, canvis en el turisme, entre d'altres).

### 1.3. Canvi climàtic

#### 1.3.1 Canvi climàtic global

Durant les tres últimes dècades la superfície terrestre ha experimentat un escalfament global continu. Aquest escalfament del sistema climàtic és inequívoc des del decenni del 1950. L'atmosfera i l'oceà s'han escalfat, les quantitats de neu i gel han disminuït i el nivell del mar ha augmentat. La influència humana sobre el sistema climàtic és clara i les emissions antropogèniques recents de gasos d'efecte hivernacle són les més altes de la història. Aquests canvis climàtics recents han tingut impactes generalitzats en els sistemes naturals i humans (IPCC, 2014).

En la Figura 1.7 es pot observar que el període del 1980 al 2012 ha estat probablement el més càlid dels darrers trenta anys. Durant aquest període la mitjana global de la temperatura de la superfície terrestre i de l'oceà combinades mostren un escalfament de 0,85 °C (0,65 a 1,06 °C) (IPCC, 2014).

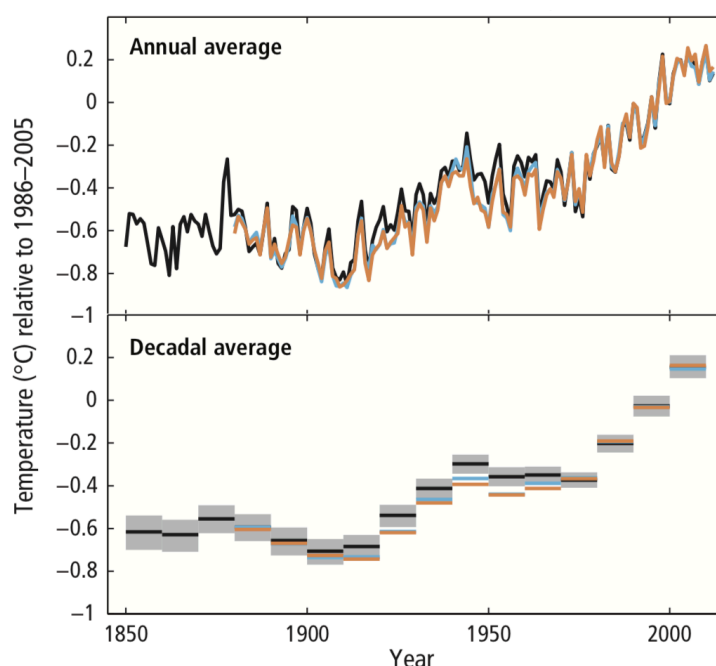


Figura 1.7. Anomalies combinades de la temperatura de la superfície terrestre i oceànica de forma anual i global respecte a la mitjana del període 1986-2005. Els colors indiquen diferents conjunts de dades amb una estimació de la incertesa de la mitjana per decenni (ombrejat gris). Font: IPCC, 2014

Des de l'era preindustrial, les emissions antropogèniques de gasos d'efecte hivernacle (GEH) han anat augmentant impulsades en gran mesura pel creixement econòmic i

demogràfic. Les concentracions de diòxid de carboni (CO<sub>2</sub>), metà (CH<sub>4</sub>) i òxid nitrós (N<sub>2</sub>O) han augmentat des del 1750 de 40 %, 150 % i 20 %, respectivament. Els efectes d'aquestes emissions juntament amb altres efectes antropogènics s'han detectat a tot el sistema climàtic i és molt probable que hagin estat la causa dominant de l'escalfament observat des de mitjans del segle XX (IPCC, 2014).

L'emissió continuada d'aquests gasos d'efecte hivernacle provocarà un major escalfament i canvis en tots els components del sistema climàtic, augmentant la probabilitat dels impactes per a les persones i els ecosistemes. Aquestes emissions són originades principalment segons les dimensions de la població, l'activitat econòmica, l'estil de vida, l'ús d'energia, els patrons d'usos del sòl, la tecnologia i la política climàtica.

Pel que fa a les projeccions d'emissions d'efecte hivernacle (RCPs, Representation Concentration Pathways), es descriuen quatre tendències diferents per al segle XXI d'emissions de GEI i concentracions atmosfèriques, emissions contaminants de l'aire i usos del sòl. Les RCP inclouen un escenari de mitigació estricta (RCP2.6), dos escenaris intermedis (RCP4.5 i RCP6.0) i un escenari amb emissions de GEH molt elevades (RCP8.5). El RCP2.6 és representatiu d'un escenari que pretén mantenir l'escalfament global probablement per sota dels 2 °C.

		2046–2065		2081–2100	
	Scenario	Mean	Likely range <sup>c</sup>	Mean	Likely range <sup>c</sup>
Global Mean Surface Temperature Change (°C) <sup>a</sup>	RCP2.6	1.0	0.4 to 1.6	1.0	0.3 to 1.7
	RCP4.5	1.4	0.9 to 2.0	1.8	1.1 to 2.6
	RCP6.0	1.3	0.8 to 1.8	2.2	1.4 to 3.1
	RCP8.5	2.0	1.4 to 2.6	3.7	2.6 to 4.8
	Scenario	Mean	Likely range <sup>d</sup>	Mean	Likely range <sup>d</sup>
Global Mean Sea Level Rise (m) <sup>b</sup>	RCP2.6	0.24	0.17 to 0.32	0.40	0.26 to 0.55
	RCP4.5	0.26	0.19 to 0.33	0.47	0.32 to 0.63
	RCP6.0	0.25	0.18 to 0.32	0.48	0.33 to 0.63
	RCP8.5	0.30	0.22 to 0.38	0.63	0.45 to 0.82

Taula 1.1. Canvi previst de la temperatura mitjana global de la superfície i de la mitjana global del nivell del mar per a mitjans i finals del segle XXI, respecte al període 1986-2005. Font: IPCC, 2014

Els diferents escenaris i models preveuen un augment de la temperatura superficial global superior a 1,5°C a finals del segle XXI (2081–2100). L'augment de la temperatura mitjana global al 2100 respecte el període 1986-2005 és probable que sigui de 0,3 °C a 1,7 °C sota l'escenari RCP2.6, d'1,1 °C a 2,6 °C sota l'escenari RCP4. 5, d'1,4 °C a 3,1 °C



sota l'escenari RCP6.0 i de 2,6 ° C a 4,8 ° C sota l'escenari RCP8.5. (Taula 1.1). La Figura 1.8. mostra les projeccions del canvi global de la temperatura superficial per als diferents escenaris de l'IPCC (RCP 2.6, RCP4.5, RCP 6.0 I RCP 8.5). En la Figura 1.8, les línies mostren les tendències més probables, i les zones ombrejades els intervals més probables per als escenaris RCP2.6 (blau) i RCP8.5 (vermell). Les barres verticals de colors a la dreta representen la temperatura estimada (línies de colors) i els intervals més probables per al 2100 per a tots els escenaris RCP. Si la temperatura superficial mitjana global augmenta, és molt probable que les ones de calor es produeixin amb una freqüència més elevada i tinguin una durada més llarga. Per a l'horitzó 2050, els RCPs preveuen una temperatura mitjana global entre 0,9 i 2°C pel RCP 4.5 i entre 1,4 i 2,6°C pel RCP 8.5 respecte el període 1986-2005.

D'altra banda, els canvis en la precipitació mostren un grau elevat d'incertesa, no seran uniformes i presenten una variabilitat tant espacial com temporal. En algunes zones és probable que és doni un augment de les precipitacions mitjanes (altes latituds i el Pacífic equatorial o zones humides de latitud mitjana) en d'altres una disminució (regions més seques i subtropicals de latitud mitjana) sota l'escenari RCP 8.5. En les latituds mitjanes i les regions tropicals humides els models preveuen esdeveniments de precipitacions extrems més intensos i freqüents (IPCC, 2014).

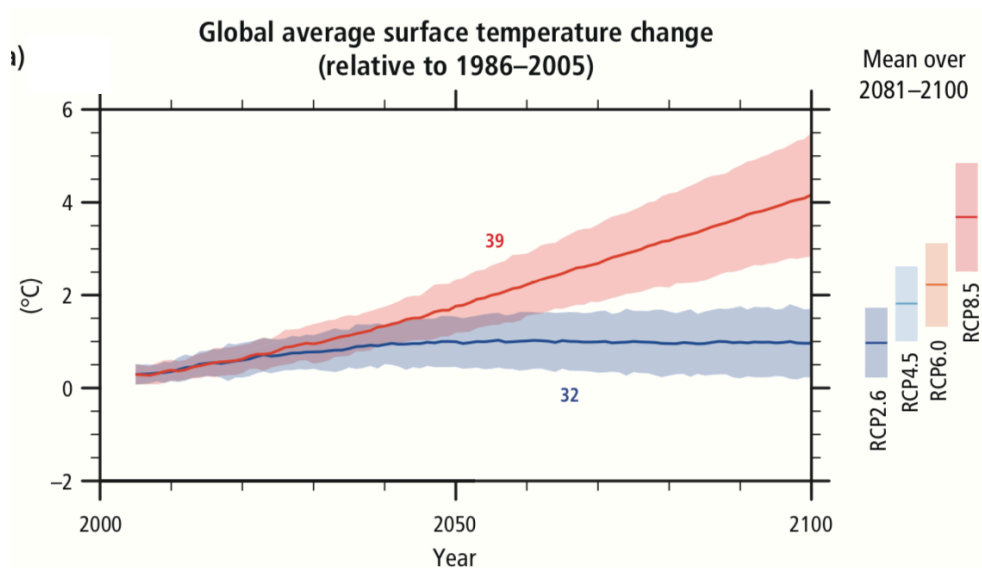


Figura 1.8. Projeccions del canvi de la mitjana global de la temperatura superficial del 2006 al 2100 per a diferents escenaris de l'IPCC. Font: IPCC, 2014

Els models del sistema terrestre projecten un augment global de l'acidificació oceànica per a tots els escenaris RCP a finals del segle XXI. Es preveuen també reduccions anuals del gel de l'Àrtic. Segurament l'extensió del permafrost de la superfície en latituds altes de l'hemisferi nord es reduirà a mesura que augmenti la temperatura mitjana global. El volum global de les glaceres, excloent les glaceres a la perifèria de l'Antàrtida i Groenlàndia, també disminuirà. L'augment global del nivell del mar continuarà durant el segle XXI, molt probablement a un ritme més ràpid que el que s'observa del 1971 al 2010 (0,19 m). Per al període 2081–2100 respecte al 1986–2005, l'alça probablement se situarà entre els 0,26 i els 0,55 m.

D'altra banda, el canvi climàtic afectarà els nínxols ecològics de moltes espècies vegetals i animals i també causarà un elevat risc en la seva extinció. També s'estima una reducció dels recursos d'aigua superficial i subterrània a la majoria de regions subtropicals seques intensificant la competència per a l'aigua entre els diferents sectors.

A les zones urbanes es preveu que el canvi climàtic augmenti els riscos per a les persones, els béns, les economies i els ecosistemes, inclosos els riscos deguts a les fortes calors, les tempestes i precipitacions extremes, inundacions, esllavissades, contaminació de l'aire, sequera, escassetat d'aigua i augment del nivell del mar. Aquests riscos s'amplifiquen per a aquells que no disposen d'infraestructures i serveis essencials o que viuen en zones exposades (IPCC, 2014).

### **1.3.2. Canvi climàtic als Pirineus**

Com moltes zones d'alta muntanya, els Pirineus són la font d'aigua principal de moltes regions i aquesta aigua és necessària per assegurar el subministrament aigües avall i diverses activitats econòmiques (García-Ruiz et al., 2011a; Viviroli, Dürr, Messerli, Meybeck i Weingartner, 2007).

En aquestes zones, les capçaleres produeixen la major part del recurs hídric superficial de la conca de l'Ebre (Batalla, Gomez i Kondolf, 2004; López-Moreno et al., 2011; López i Justríbó, 2010) i estan regulats per embassaments que garanteixen el subministrament

d'aigua per a l'agricultura, la producció d'energia hidroelèctrica, la indústria, el turisme i els usos domèstics (García-Vera, 2013).

Els científics i els gestors de l'aigua han observat un descens gairebé generalitzat de l'escolament dels rius mediterranis en les darreres dècades (Le Treut, 2013; López-Moreno, 2005; López-Moreno et al., 2011; López-Moreno, Beguería i García-Ruiz, 2006; Lorenzo-Lacruz, Vicente-Serrano, López-Moreno, Morán-Tejeda i Zabalza, 2012). Aquesta tendència s'explica pel canvi en les condicions climàtiques i en la coberta del sòl a causa dels canvis en els usos del sòl. S'ha observat un augment de la temperatura, generalment entre 1 i 2 °C en la regió des de principis del segle XX (Alpert, Krichak, Shafir, Haim i Osetinsky, 2008; Brunetti, Buffoni, Mangianti, Maugeri i Nanni, 2004), que provoquen un augment de la precipitació en forma líquida i una disminució de les nevades. El resultat és un augment del cabal hivernal, una fusió de la neu més primerenca i una reducció del cabal estival (López-Moreno i García-Ruiz, 2004; Senatore, Mendicino, Smiatek i Kunstmann, 2011). La disminució dels cabals també va associada a un augment de l'evapotranspiració a causa dels canvis en els usos del sòl i la coberta vegetal (Lepinas, Ludwig i Heussner, 2010). Un exemple és l'abandonament dels conreus i pastures des de mitjans del segle XX cap a boscos i matolls que representen una disminució dels cabals del 30 % aproximadament (Beguería, López-Moreno, Lorente, Seeger i García-Ruiz, 2003; García-Ruiz i Lana-Renault, 2011b). També s'ha identificat una disminució de les precipitacions que ha causat la reducció de l'escolament en moltes conques mediterrànies (García-Ruiz et al., 2011a). La precipitació hivernal ha disminuït al voltant del 10 %, provocant una disminució de l'acumulació de neu a l'hivern i a la primavera (López-Moreno, 2005; López-Moreno et al., 2011).

Els models climàtics prediuen un augment notable de la temperatura d'1-2 °C per a un horitzó temporal proper (2021-2050) i sota un escenari moderat d'emissions de gasos d'efecte hivernacle (A1B) (López-Moreno et al., 2014). L'evolució de la precipitació està subjecta a molta incertesa i variabilitat, però tots els models de la regió projecten una disminució de la precipitació anual. S'espera que l'estiu estigui subjecte a les tendències més extremes, mentre que les temperatures i les precipitacions hivernals simulades es mostren menys afectades. L'augment de la vegetació a les capçaleres de les muntanyes

mediterrànies encara continua (García-Ruiz et al., 2011a). La magnitud de l'impacte del canvi de la coberta del sòl sobre la resposta hidrològica dependrà de les característiques de la conca, el tipus de vegetació, l'edat dels boscos, la intensitat dels esdeveniments de precipitació i els efectes de l'escala espacial (Andréassian, 2004; Calder, 2007). Les simulacions hidrològiques (López-Moreno et al., 2014) es basen en el supòsit que les zones d'arbustos poden evolucionar cap a bosc i que és molt probable que l'arbust colonitzi prats subalpins (García-Ruiz et al., 2011a). La reducció del cabal mitjà anual serà d'un 16 % associat a aquesta hipotètica evolució de la coberta del sòl i supera la reducció simulada en les projeccions del canvi climàtic. Això confirma la necessitat d'estudiar els efectes combinats del canvi climàtic i de la coberta del sòl per desenvolupar escenaris fiables de la disponibilitat futura de recurs hídric (Parajuli, 2010; Tong, Sun, Ranatunga, He i Yang, 2012).

Diversos estudis que consideren l'impacte de les projeccions climàtiques sobre el recurs hídric de diferents conques del Pirineu prediuen que la disponibilitat anual d'aigua superficial el 2050 podria disminuir d'un 10 a un 20 % respecte al període de referència 1970-2000 (Caballero et al., 2007; López-Moreno et al., 2014; Quintana-Seguí et al., 2010). La majoria d'aquests estudis consideren el canvi climàtic com a principal motor del canvi hidrològic, però com hem vist anteriorment s'haurien de considerar els efectes combinats del canvi en el clima amb els usos del sòl.

Per tant, la forta dependència del recurs hídric de muntanya a les fluctuacions en el clima i les característiques d'ocupació del sòl afecta directament la quantitat total i la distribució temporal del cabal, i tindrà importants implicacions per a la gestió de l'aigua (López-Moreno et al., 2008a).

### **1.3.3. Canvi climàtic a Andorra**

En el cas d'Andorra, també s'ha observat un canvi en les tendències climàtiques pel que fa a la temperatura i les precipitacions a partir de les sèries històriques de FEDA. L'Observatori de la Muntanya d'Andorra del CENMA (OMA, 2019) publica la tendència de les temperatures a Andorra aportant la magnitud de l'escalfament global a escala

local. La Figura 1.9 presenta l'anomalia de la temperatura mitjana anual a Andorra (1950-2015) mostrant un augment de la temperatura mitjana anual de 0,18 °C/decenni.

Aquest augment és més pronunciat a partir de finals del decenni dels 1980, quan se succeeixen la majoria dels anys més càlids (valors d'anomalia positiva més grans).

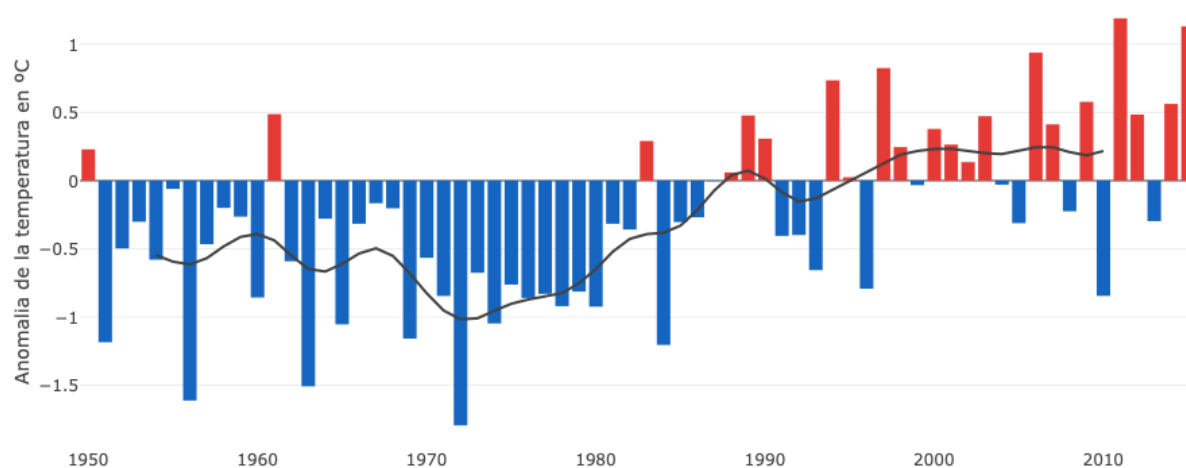


Figura 1.9. Anomalia de la temperatura mitjana anual a Andorra des del 1950 fins al 2015. Font: OMA, 2019

La precipitació anual mostra una lleugera tendència a la disminució al voltant de -2,6 %/decenni, tot i que no és estadísticament significativa. Les barres grogues (anomalies negatives) indiquen els anys secs i les verdes (anomalies positives) els anys més humits (vegeu Figura 1.10).

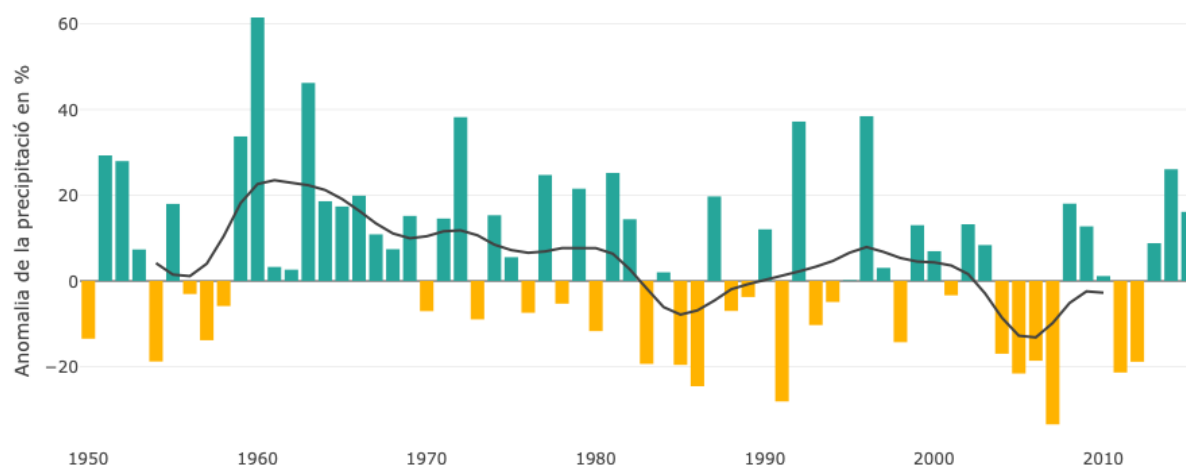


Figura 1.10. Anomalia de la precipitació acumulada anual a Andorra des de 1950 fins al 2015. Font: OMA, 2019

Pel que fa a la previsió de l'evolució futura, les projeccions climàtiques es basen en escenaris esperats d'increment d'emissions d'efecte hivernacle. Pel cas d'Andorra, el Govern d'Andorra (Govern d'Andorra, 2019b) ha realitzat un estudi sobre les emissions de gasos d'efecte hivernacle. Tenint en compte els objectius de la CCNUCC (Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques), desenvolupen una sèrie de projeccions contínues fins a l'horitzó 2050, a partir de tres escenaris:

1. Un escenari BAU (Business as usual), que considera tendències immobiliàstes en relació a la mitigació
2. Un escenari amb mesures existents sobre la base d'accions de mitigació ja realitzades
3. Un escenari amb mesures addicionals sobre la base d'accions de mitigació previstes

Sota les consideracions emeses per a cada escenari (Govern d'Andorra, 2019b), l'escenari BAU (habitual) arriba a emissions de 643,47 Gg CO<sub>2</sub> eq. el 2050, l'escenari amb mesures existents limita aquestes emissions de 67,37 Gg CO<sub>2</sub> eq. sent de 576,10 Gg CO<sub>2</sub> eq. (és a dir, una reducció del 10,5 % respecte al BAU) gràcies als resultats del desplegament de mesures ja realitzades amb les polítiques mediambientals, com ara el sanejament a Andorra amb el tractament de les aigües residuals.

Pel que fa a l'escenari amb mesures addicionals, es presenten dos subescenaris (a i b), en funció de l'assumpció relativa a la capacitat d'influència del vehicle elèctric sobre la quota d'hidrocarburs venuts al país. L'escenari «a» on el 50 % de la reducció del consum prevista per a totes les importacions de combustible i l'escenari «b» on s'espera un 50 % de reducció del consum relacionades amb el desplaçament intern. Les emissions per a l'escenari «a» s'estimen en 206,17 Gg CO<sub>2</sub> eq. (-68 % en comparació amb el BAU), i la reducció arriba al 39,9 % en comparació amb el BAU amb 386,52 Gg eq. quan es considera l'escenari «b» (Figura 1.11).

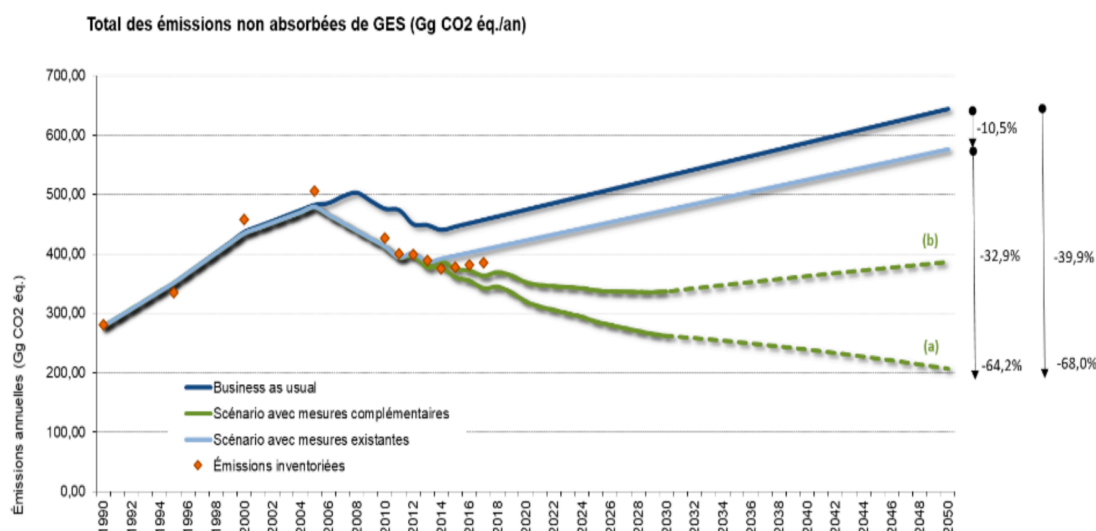


Figura 1.11. Projeccions de les emissions no absorbides de GEH per als diferents escenaris definits. Font: Govern d'Andorra, 2019b

Per al 2030, les contribucions previstes determinades a nivell nacional (CPDN) d'Andorra estan d'acord amb l'evolució de les concentracions representatives de l'escenari RCP 2.6 i són compatibles amb el manteniment de l'augment de la temperatura global per sota dels 2 °C durant el segle XXI en comparació amb els valors de 1850 a 1900. També són consistents amb un escenari amb mesures de mitigació estrictes i el manteniment de concentracions globals de CO<sub>2</sub> eq. en el rang 430-480 ppm. Aquests compromisos es concreten per una reducció de les emissions equivalents no absorbides a Andorra d'un 37 % (193,73 Gg CO<sub>2</sub> eq.) en comparació amb les emissions no absorbides del BAU definides sobre la base del primer informe biennal d'Andorra a la Convenció marc de les Nacions Unides sobre el canvi climàtic (desembre 2014), per al 2030.

Pel que fa a mesures de mitigació adequades a nivell nacional (NAMA), el document recull les accions que Andorra està duent a terme actualment. Aquestes accions van permetre generar projeccions d'emissions de gasos d'efecte hivernacle fins al 2050 per als escenaris BAU, amb mesures existents i amb mesures addicionals. Per a més detalls podeu consultar l'informe del Govern d'Andorra *Troisième rapport bisannuel à la convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques* (Govern d'Andorra, 2019b).

L'estudi més recent a Andorra (Pons, 2017) fa una primera aproximació de projeccions locals de canvi climàtic a partir de les sèries històriques de temperatura i precipitació de l'estació de Ransol (1.645 m.s.n.m.). S'analitza la base de dades de l'EURO-CORDEX i s'obtenen mitjanes de projeccions climàtiques per al conjunt d'Andorra. Aquesta base de dades és un conjunt de diferents models climàtics regionals d'alta resolució per a tot Europa, obtinguts mitjançant *downscallings* dinàmics i estadístics. Aquest conjunt de simulacions té una resolució de 12,5 km i estan disponibles per a diferents escenaris d'emissions i per a diferents horitzons temporals.

Les projeccions indiquen un increment de la temperatura mitjana anual a Andorra d'entre 1,3 °C i 1,7 °C a curt termini (període 2021-2050) respecte al període 1975 a 2005. A mig termini (període 2041-2070), s'espera un increment d'entre 1,7 °C i 3 °C, mentre que a llarg termini (2071-2100) l'increment s'estima entre 2,2 °C i 5,1 °C. Aquests increments es preveuen més significatius durant els mesos d'estiu (entre 1,7 °C i 2,2 °C a curt termini, entre 2,1 °C i 3,3 °C a mig termini i entre 2,5 °C i 6 °C a llarg termini).

Pel que fa a les precipitacions, es projecta una disminució d'un 3 % del total anual a curt termini respecte el període de referència (1975 a 2005), d'entre un 2 % i un 5 % menys a mig termini, i d'entre un 2 % i un 15 % menys a llarg termini. Les precipitacions totals en els mesos d'estiu es podrien reduir fins a un 27 % a llarg termini, mentre que a l'hivern i a la tardor els canvis es preveuen menys importants i oscil·laran entre + 4 % i - 8 % en funció de l'escenari d'emissions i de l'horitzó temporal. A la primavera, els canvis projectats a curt termini són poc significatius, amb una tendència a l'alça en l'horitzó a llarg termini, on es projecten variacions d'entre -4 % i -12 % del total de precipitació (Figura 1.12).

Finalment, també destaca un increment progressiu per als diferents horitzons temporals tant dels dies anormalment càlids com de la freqüència d'onades de calor. D'altra banda, també es projecta una disminució progressiva del nombre de dies anormalment freds. Pel que fa a les precipitacions intenses, en les projeccions no s'observa una variació significativa de la freqüència d'aquests esdeveniments.



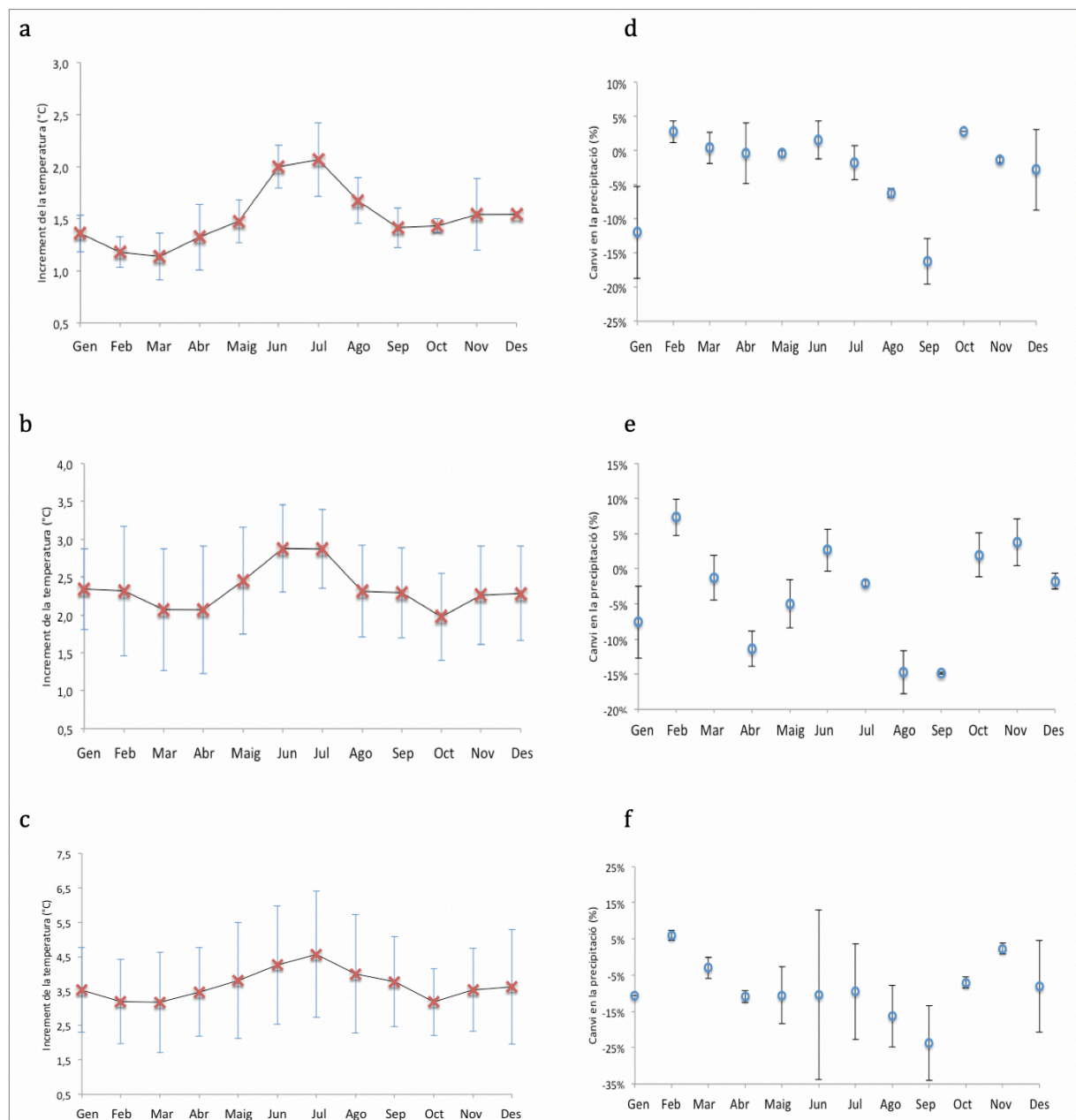


Figura 1.12. Canvis projectats en la temperatura i precipitació. Increment màxim, mínim i mitjana de la temperatura mitjana mensual a curt (a), mitjà (b) i llarg (c) termini. Variació màxima, mínima i mitjana de la precipitació mensual respecte l'escenari de referència a curt (d), mitjà (e) i llarg (f) termini. Font: Pons, 2017.

#### **1.4. Recurs hídric i canvi climàtic**

Les muntanyes són la principal font d'aigua a tot el món i gran part de l'escolament en aquestes zones assegura el subministrament d'aigua zones avall (García-Ruiz et al., 2011a; Viviroli et al., 2007). En aquest context, les zones de muntanya s'han identificat com a àrees especialment vulnerables als impactes del canvi climàtic i el recurs hídric considerat com un dels elements més exposats i que major vulnerabilitats pot comportar en un futur tant en ecosistemes com en la societat humana (Allen et al., 2014; Mas-Pla, 2010).

Els escenaris climàtics projecten un major augment de la temperatura en zones d'alta muntanya que en zones menys elevades (Bradley, Vuille, Diaz i Vergara, 2006; Giorgi, 2006; Nogués-Bravo et al., 2007). La forta dependència del recurs hídric de muntanya a les fluctuacions del clima i les característiques d'ocupació del sòl afecta directament la quantitat i la distribució temporal del cabal, i per tant, té importants implicacions per a la gestió de l'aigua (Haro-Monteagudo, Palazón i Beguería, 2020; López-Moreno, et al., 2008a). Segons les projeccions de diversos models de canvi climàtic, si la temperatura en el futur augmenta entre 2 i 4 °C, és probable que s'observi una disminució dels cabals d'entre un 4 i 21 % respectivament (Frederick, 1997) i una disminució de l'emmagatzematge d'aigua mitjana anual i de la producció d'energia (López-Moreno et al., 2008a).

A més de l'augment mitjà de temperatura, s'espera una major ocurrència d'esdeveniments càlids extrems (Beniston, 2003; Giorgi i Lionello, 2008; Herrero et al., 2017). Aquestes projeccions climàtiques suggereixen una menor capacitat de generació d'escolament i com a conseqüència un augment de l'evapotranspiració (Lespinas et al., 2010; López-Moreno et al., 2011; Liuzzo, Noto, Vivoni i La Loggia, 2010).

L'evolució de la precipitació està subjecta a una gran incertesa i variabilitat, però la majoria dels estudis preveuen una tendència general cap a una disminució (Evans, 2009; Gibelin i Déqué, 2003; Giorgi, Bi i Pal, 2004; Giorgi i Lionello, 2008; Goubanova i Li, 2007; Herrero et al., 2017; López-Moreno et al., 2014; Ragab i Prudhomme, 2002).

D'altra banda, en les zones de muntanya, la hidrologia alimentada per les conques de neu és notablement més sensible a la variabilitat climàtica i als canvis, ja que la neu i el gel responen ràpidament a lleugeres variacions en la precipitació i la temperatura (Carrivick i Brewer, 2004; Gray, 2001; López-Moreno i García-Ruiz, 2004; López-Moreno i Latron, 2008b). L'augment de la temperatura ha causat una disminució en l'acumulació de neu en latituds mitges i elevades, que sovint ha estat amplificada per les tendències negatives en la precipitació durant l'hivern. El resultat és una reducció del pic de cabal durant la fosa de neu a la primavera (Barnett et al., 2008; Christensen i Lettenmaier, 2007; Dawadi i Ahmad, 2012), un inici més primerenc de la fusió de la neu i una disminució de l'escolament durant la primavera amb el consegüent inici més primerenc del període de dèficit hídric (García-Ruiz et al., 2011a; López-Moreno i García-Ruiz, 2004; López-Moreno, 2005; Senatore et al., 2011).

El cabal és una resposta integral a les entrades en la conca (dades climàtiques), la transferència d'aigua, les pèrdues d'aigua per processos d'emmagatzematge per evapotranspiració i els efectes de les activitats humanes (López-Moreno et al., 2013). Varis estudis han demostrat que el temps de resposta de la conca a condicions climàtiques precedents és molt variable entre les regions, ja que depèn de les característiques físiques de cada conca (geologia, topografia, sòls i vegetació), de les condicions climàtiques (taxes d'evapotranspiració, la capa de neu, intensitat de les pluges) i les construccions de preses (Fleig, Tallaksen, Hisdal i Hannah, 2011; Lorenzo-Lacruz et al., 2010; McDonnell et al., 2010).

S'ha revelat una disminució del recurs hídric al Pirineu i aquesta disminució continuarà en el futur (Beguería et al., 2019). Aquesta disminució és deguda per una banda a un augment en el consum d'aigua per a les activitats humanes (noves urbanitzacions, estacions d'esquí, dispositius generadors de neu artificial, etc.) i per altra banda, a intenses modificacions en la coberta vegetal i els usos del sòl en àrees on la pressió humana ha disminuït i el pasturatge i el cultiu han desaparegut. Aquests tipus de canvis en la coberta del sòl han ocorregut principalment en les capçaleres de muntanya, on es genera la major part dels recursos d'aigua (García-Ruiz i Lana-Renault, 2011b; García-Ruiz et al., 2011a; López-Moreno et al., 2011; Vicente-Serrano, Lasanta i Romo, 2004; Warburton, Schulze i Jewitt, 2012; Weatherhead i Howden, 2009). Per altra banda, la

reforestació provoca una disminució en la generació de l'escolament i una resposta atenuada a esdeveniments de fortes pluges (Andréassian, 2004; Beguería et al., 2003; Gallart i Llorens, 2004; Ranzi, Bochicchio i Bacchi, 2002) a causa dels efectes sobre l'evapotranspiració i les taxes d'intercepció o infiltració, la dinàmica de la humitat del sòl i la recàrrega d'aqüífers (Beguería et al., 2006; Cosandey et al., 2005; David et al., 2006; Llorens i Domingo, 2007; López-Moreno i Latron, 2008b). Per tant, podem dir que els efectes combinats de la regeneració dels boscos i el canvi climàtic afecten el balanç hídric i poden reduir els cabals anuals (López-Moreno et al., 2014).

La recerca sobre el canvi ambiental i el funcionament hidrològic als Pirineus ha aportat un avançat coneixement sobre els canvis hidrològics a diverses escales espacials (Beguería et al., 2003; García-Ruiz et al., 2008). Malgrat això, hi ha molts components del sistema hidrològic que segueixen sent poc coneguts, com a conseqüència de la manca de dades hidrometeorològiques especialment a l'alta muntanya i les dificultats associades amb l'estimació actual de l'evapotranspiració, l'equivalent en aigua de la neu i la recàrrega d'aigua subterrània a escala de conca (López-Moreno et al., 2011).

Les decisions de planificació del recurs hídric futur s'han de basar no només en la demanda d'aigua, sinó també en els escenaris futurs del clima i del cabal. Les incerteses inclouen com els canvis ambientals afectaran la quantitat i qualitat dels recursos d'aigua i els règims fluvials, i com els nous escenaris afectaran la gestió de l'aigua (García-Ruiz et al., 2011a).

#### **1.4.1. Recurs hídric i canvi climàtic a Andorra**

L'anàlisi dels impactes del canvi climàtic sobre el recurs hídric a Andorra ha estat fins a dia d'avui un fenomen poc estudiat. S'estima que els canvis projectats en la temperatura i la precipitació afectin el recurs hídric, no obstant la magnitud d'aquests canvis encara és bastant incerta. D'altra banda, aquest canvi en el patró de temperatures i precipitacions es preveu que afecti de forma significativa la coberta de neu del Principat, tant en la distribució, com en els gruixos i en l'estacionalitat (López-Moreno et al., 2014; Pons et al., 2014; Pons, Johnson, Rosas-Casals, Sureda i Jover, 2012). Degut a l'important paper que juga la neu en el règim hidrològic en les nostres latituds, aquesta

dinàmica tindrà un fort impacte tant en la quantitat del recurs disponible com en la seva temporalitat (López-Moreno i García-Ruiz, 2004; Tague i Peng, 2013). A més, els processos hidrològics en zones de muntanya són especialment sensibles al canvi climàtic degut als abruptes canvis de temperatura i precipitació a curtes distàncies com a conseqüència de l'orografia (Beniston, 2005).

L'única primera aproximació feta sobre l'afectació del canvi climàtic sobre el recurs hídric estima que respecte els 282 hm<sup>3</sup>/any de mitjana (període 1961-1990), s'esperen canvis de -42 hm<sup>3</sup> per al període 2021-2050 (-14,9 %) i -106 hm<sup>3</sup> per al període 2071-2100 (-37,6 %) (Govern d'Andorra, 2019b). No obstant, la metodologia i les fonts de com es realitza aquesta estimació no estan documentades. Justament, aquesta manca d'estudis científics en aquest àmbit porta a que la caracterització dels efectes del canvi climàtic sobre el recurs hídric a Andorra sigui uns dels objectius principals d'aquesta tesi.

Per altra banda, el 2 de març del 2011, Andorra s'adhereix a la Convenció Marc de les Nacions Unides sobre el Canvi Climàtic i està, per tant, subjecta a obligacions específiques com presentar un inventari de les emissions de gasos d'efecte hivernacle i establir programes nacionals o regionals per mitigar el canvi climàtic i facilitar-ne l'adaptació adequada (Govern d'Andorra, 2019b). Recentment, algun estudi ha començat a abordar com el canvi climàtic i els d'usos del sòl poden afectar algunes zones de muntanya del Pirineu (López-Moreno et al., 2013). No obstant, encara no existeix cap estudi a la literatura científica que abordi en detall per al cas d'Andorra aquest aspecte, així com tampoc el seu vincle amb el model socioeconòmic i els usos de l'aigua. Tot i que la situació actual és positiva, diferents agents implicats en la gestió preveuen possibles conflictes i dificultats en la gestió futura com a conseqüència del canvi climàtic i un increment en la pressió sobre el recurs ja sigui per la major necessitat de produir neu artificial o l'increment de l'aprofitament hidroelèctric planificat pel Govern. En aquest context, tant el darrer informe bianual del Govern d'Andorra en el marc del conveni de les Nacions Unides sobre Canvi Climàtic (Govern d'Andorra, 2019b) com el procés d'adaptació d'Andorra al canvi climàtic (PAACC) (Govern d'Andorra, 2014), remarquen que degut a la seva importància, els impactes sobre el recurs hídric seran un dels eixos prioritaris a analitzar amb detall i del qual s'hauran de començar a dissenyar i

desenvolupar mesures i estratègies d'adaptació el més aviat possible. D'aquest requeriment per part de les Nacions Unides, s'emfatitza la necessitat de conèixer millor la vulnerabilitat, els impactes i les estratègies d'adaptació en relació als sectors dependents del recurs hídric.

Per tant, la gestió sostenible de l'aigua s'enfrontarà a grans reptes de futur degut a les creixents pressions sobre el recurs, per una banda pel canvi climàtic i per l'altra per l'anomenat canvi global (canvis d'usos del sòl i model social de consum), el qual ha comportat un constant augment de la demanda hídrica. El millor coneixement d'aquestes relacions i impactes permetrà una millor definició de les estratègies més adients i eficaces per fer front als efectes del canvi climàtic i global i per tant assolir una millor planificació d'una gestió sostenible de l'aigua a Andorra.

A partir d'aquí la hipòtesi que es planteja en aquesta tesi és que la confluència del canvi climàtic i els canvis socioeconòmics de futur poden portar a tensions temporals i geogràfiques al recurs hídric. Tot i que a Andorra ens trobem en la zona de capçalera amb un recurs hídric abundant, aquests canvis en el clima i els canvis a nivell socioeconòmic poden arribar a crear conflictes en moments puntuals amb la gestió del recurs. D'aquesta hipòtesi en deriven els següents objectius.

## **1.5. Objectius de la tesi**

### **1.5.1. Objectiu General**

L'objectiu general de la tesi és explorar de forma multidisciplinària i integral el recurs hídric d'Andorra. Mitjançant el desenvolupament d'un model integral del recurs hídric, es pretén analitzar diferents escenaris futurs combinant canvis en diferents variables tant climàtiques com socioeconòmiques (evolució de la població, del turisme, entre d'altres).

### **1.5.2. Objectius específics**

A continuació es defineixen els objectius específics fonamentals per assolir l'objectiu general:

- 1) Caracteritzar històricament el recurs hídric d'Andorra amb la recopilació de dades climàtiques i hidrològiques .
- 2) Aplicació d'un model hidroecològic RHESys (Regional Hydro-Ecological Simulation System) a escala de país sota diferents escenaris de canvi climàtic i usos del sòl per obtenir projeccions de la disponibilitat futura de recurs hídric.
- 3) Estudiar la demanda històrica del recurs hídric a Andorra i el model de gestió a partir de la recollida de dades de consums dels diferents comuns d'Andorra, de FEDA i de les estacions d'esquí.
- 4) Aplicació d'un model socioecològic amb WEAP (Water Evaluation And Planning System) que permeti vincular les interrelacions entre el clima, el recurs hídric, la demanda i altres factors socioeconòmics que l'afecten.
- 5) Crear diferents escenaris de canvi global, combinant canvis en diferents variables tant climàtiques, de canvis en els usos del sòl com socioeconòmiques (evolució de la població, de la producció de neu artificial, del turisme, de l'urbanisme) per veure l'evolució futura del recurs hídric a Andorra.
- 6) Analitzar i dissenyar polítiques d'adaptació al canvi climàtic i de gestió sostenible del recurs hídric adaptades a les especificitats i requeriments prioritaris per a Andorra.



## 1.6. Metodologia

Per tal de desenvolupar un model integral del recurs hídric a Andorra es duen a terme una sèrie d'accions paral·leles. El següent diagrama de flux permet tenir una visió general de com els diferents objectius específics, eines i metodologies emprades es relacionen per a la consecució de l'objectiu principal de la tesi (Figura 1.13).

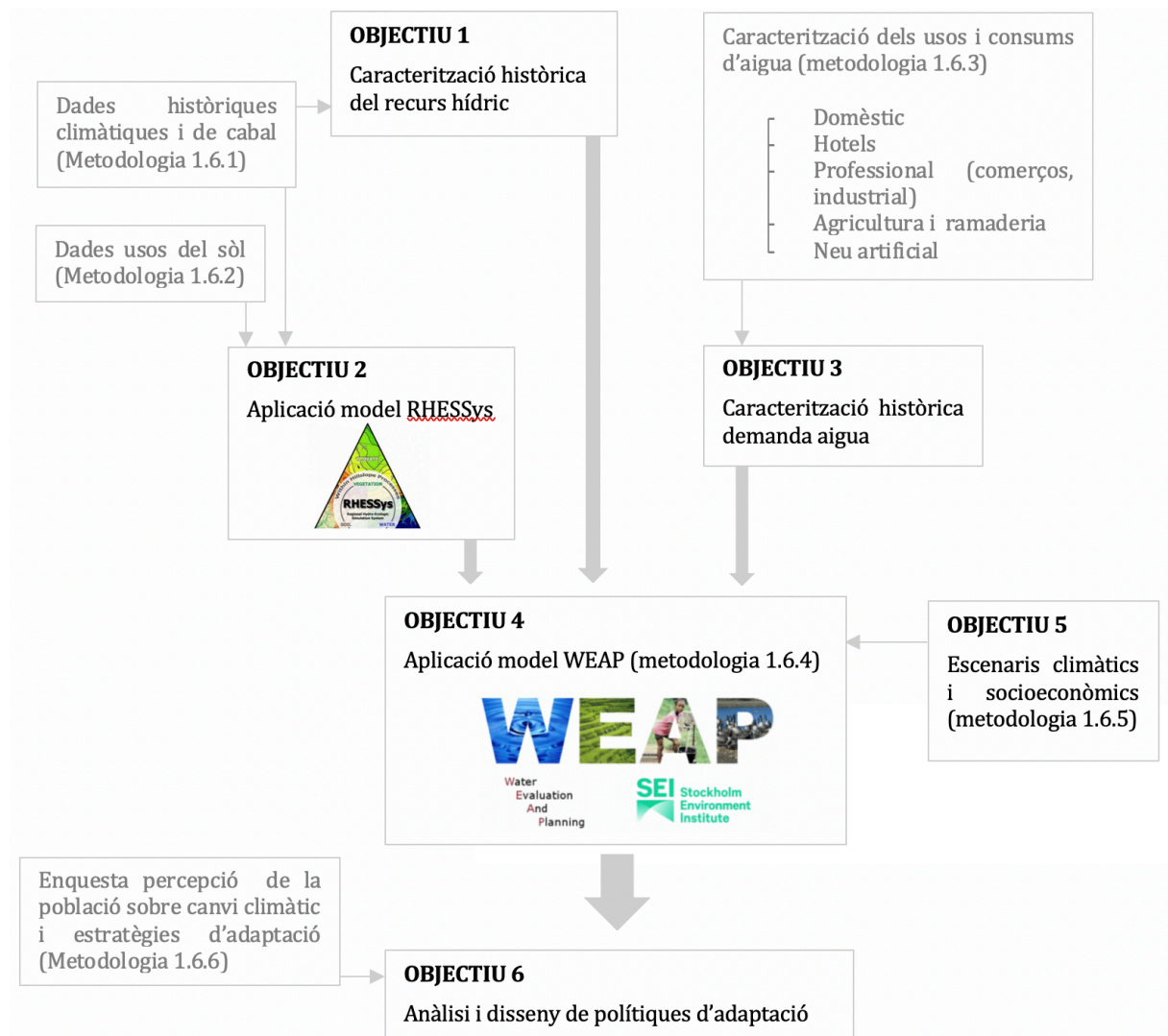


Figura 1.13. Diagrama de flux de treball de la tesi doctoral. Font: Elaboració pròpia

Per entendre millor la interacció i transvasament de dades entre els models clarificar que amb la modelització RHESSys s'obtenen outputs de variacions del recurs hídric segons les projeccions de canvi climàtic. Per exemple, un augment de la temperatura de 2 °C donarà lloc a una disminució del cabal de 8,5 % mentre que si la temperatura augmenta 4 °C aquesta disminució de cabal serà del 14 %. Es la disminució de cabal del



8,5 % que ens servirà d'input per al model WEAP. Aquesta variació de cabal es combinarà amb els diferents escenaris socioeconòmics. El model WEAP permetrà obtenir diferents variacions de les demandes segons diferents escenaris socioeconòmics que es podran comparar amb les diferents variacions de cabal segons les projeccions climàtiques (output Rhessys).

### **1.6.1. Caracterització històrica del balanç hídric d'Andorra**

Per tal d'avaluar la caracterització històrica del recurs hídric d'Andorra es recullen dades dels informes del Ministeri de Medi Ambient del Govern d'Andorra (Govern d'Andorra, 2020b, 2020c).

Primer de tot és realitza una anàlisi de les dades històriques disponibles en els informes del Govern d'Andorra sobre el balanç hídric. Posteriorment s'analitzen les dades de cabals de les dues estacions d'aforament existents actualment al país, l'estació d'aforament del Pont d'Escaldes i de Borda Sabater. Finalment és realitza una anàlisi dels estadístics calculats i possibles tendències dels cabals històrics a Andorra.

La caracterització històrica del recurs hídric a Andorra s'explica al capítol 2.

### **1.6.2. Avaluació de les projeccions dels possibles impactes del canvi climàtic sobre el recurs hídric d' Andorra**

Per tal de poder realitzar les projeccions dels possibles impactes de canvi climàtic i usos del sòl sobre el recurs hídric s'utilitza el model hidrològic RHESSys dissenyat per modelitzar el cicle integral de l'aigua, carboni i nutrients en terreny de muntanya a petites i mitjanes escales (Figura 1.14) (Tague i Band, 2004). A partir d' informació climàtica, d'usos del sòl i cobertes vegetals, permet modelitzar fluxos verticals i laterals tant d'humitat com d'escolament (intercepció, evapotranspiració, humitat del sòl, mantell de neu, recàrrega d'aqüífers, etc.) i la seva resposta a la variabilitat i al canvi climàtic. Gràcies a aquest model hídric es generen diferents escenaris de canvi climàtic i usos del sòl que alimentaran posteriorment el model WEAP.

El model RHESSys s'utilitza amb èxit per analitzar la sensibilitat del recurs hídric a canvis ambientals, per analitzar projeccions d'evolució futura dels cabals i com aquesta

evolució afecta la gestió del recurs hídric a escala de conca (López-Moreno et al., 2014; Morán-tejeda et al., 2014; Zabalza-Martínez et al., 2018). Aquest punt de la metodologia es detalla al capítol 3.

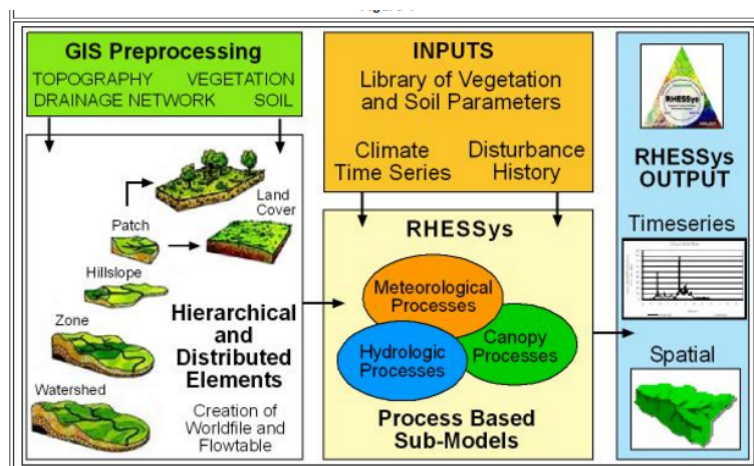


Figura 1.14. Esquema de les dades d'entrada i sortida del model hidroecològic RHESSys. Font: Tague i Band, 2004

### 1.6.3. Estudi històric de la demanda de recurs hídric a Andorra

En aquesta fase s'analitzarà l'evolució històrica de la demanda i els usos de l'aigua a Andorra. A més s'ha buscat identificar els principals factors socioeconòmics (hàbits domèstics, població, turisme, activitats econòmiques) i la seva relació amb el consum i els usos de l'aigua. Paral·lelament s'ha dut a terme un estudi sobre com la població i el seu consum d'aigua domèstic són sensibles als canvis en el preu de l'aigua. A més, es realitza una anàlisi econòmica a partir de dades de consums d'aigua del 2006 al 2015 per a la parròquia d'Andorra i s'analitza com variables com la temperatura o l'estacionalitat afecten el consum d'aigua (Reynaud, Pons i Pesado, 2018). Aquest punt es detalla en el capítol 4.

### 1.6.4. Implementació d'un model integral d'avaluació del recurs hídric

El model integral WEAP (Water Evaluation And Planning System) ha estat escollit per modelitzar de forma integral el recurs hídric d'Andorra (WEAP-Andorra). Aquest model ha estat desenvolupat per l'Institut de Medi Ambient d'Estocolm (SEI, Stockholm Environment Institute) per avaluar la demanda d'aigua, per realitzar projectes de desenvolupament del recurs hídric, avaluar impactes del canvi climàtic i escenaris de gestió de l'aigua (Stockholm Environment Institute (SEI), 2020).

Un cop caracteritzats tant l'evolució dels usos i del consum d'aigua, els comportaments de la població i les projeccions d'evolució i disponibilitat futura del recurs hídric el model ens permetrà vincular, entendre i explorar les interrelacions entre els diferents components tant ambientals com socioeconòmics que intervenen en el cicle de l'aigua a Andorra. S'espera que aquesta sigui una de les principals aportacions de la tesi ja que fins a dia d'avui tots els estudis existents que analitzaven algun dels components o processos implicats en el sistema de l'aigua (meteorologia, climatologia, consums d'aigua, etc...) ho han fet de forma aïllada sense considerar les retroalimentacions i dependències existents, cosa que portava a una visió reduïda, insuficient per poder analitzar i planificar de forma adequada polítiques i estratègies tant de gestió sostenible de l'aigua com d'adaptació sectorial al canvi climàtic.

El Govern d'Andorra quantifica històricament el recurs hídric mitjà disponible amb l'anàlisi des del 2006 del balanç hídric a partir de dades meteorològiques històriques que porten a la confecció de mapes de models de precipitació i temperatura. D'altra banda, també estimen la despesa hídrica a partir dels diferents usos de l'aigua a Andorra. Els usos de l'aigua a Andorra són molt variables en funció de les parròquies i depenen molt de les activitats econòmiques que s'hi desenvolupin. Hi ha territoris que destinen bona part del recurs al turisme i altres a l'ús domèstic o l'agricultura o, per exemple, a la producció d'energia hidroelèctrica. Això implica que en algunes ocasions puguin entrar en conflicte diverses demandes d'aigua i es pot arribar a una despesa equivalent o major al recurs hídric. Per aquest motiu és important conèixer aquests consums d'aigua i poder establir possibles previsions futures per a una bona planificació del recurs.

Andorra disposa de dades de consums anuals de les diferents parròquies i aquestes dades són públiques, però aquest tipus de dada limita l'anàlisi de la demanda. És per això que s'intenta obtenir dades més detallades del consum d'aigua per parròquia. En aquest sentit existeixen una sèrie de limitacions ja que no totes les parròquies comptabilitzen els consums d'aigua segons els diferents usos, sinó que ho tenen tot de forma segregada. D'altres parròquies sí que tenen aquests consums diferenciats per usos però aquestes dades no són públiques i s'han d'anar demanant directament a cada comú. Aquesta tasca ha estat lenta i a dia d'avui s'han obtingut únicament els consums

diferenciats per a l'any 2015. Una de les raons per les quals s'ha escollit l'eina WEAP és perquè permet fer una anàlisi simple en un principi i a mesura que s'obtenen més dades es pot anar completant el model. Aquesta tesi pretén fer una anàlisi del recurs hídric d'Andorra amb les dades obtingues però amb la finalitat que serveixi i permeti una anàlisi futura a mesura que es vagi adquirint més informació.

Aquest punt de la metodologia s'explica al capítol 5.

#### **1.6.5. Projectió de la futura evolució del recurs hídric a Andorra sota diferents escenaris de canvi global**

Un escenari és el relat d'un futur plausible. La planificació d'escenaris és un mètode de planificació estratègica que es pot emprar per explorar possibles situacions futures (Lindgren i Bandhold, 2002; Schoemaker, 1995; Van der Heijden, 2005). Idealment, els escenaris haurien de ser construïts per un grup divers de persones amb un propòsit únic i declarat. A més, la participació d'un grup divers de persones en un procés sistèmic de recopilació, discussió i anàlisi d'escenaris generarà una comprensió compartida (Peterson, Cumming i Carpenter, 2003). Els escenaris no són estats de natura (poques vegades són exhaustius) ni prediccions probabilístiques, sinó més aviat narracions coherents del que podria passar (Wack, 1985). L'objectiu dels escenaris no és predir amb precisió el futur, sinó més aviat idear possibles imatges del futur (Figura 1.15), limitar el rang d'incerteses i crear marcs de discussió (Schoemaker, 2016) amb la finalitat de conscienciar els responsables polítics i els líders empresarials de les noves tendències, dels factors clau i dels actors que poden produir canvis importants en les condicions existents (Grant, 2003; Schwartz, 1996; Wack, 1985).

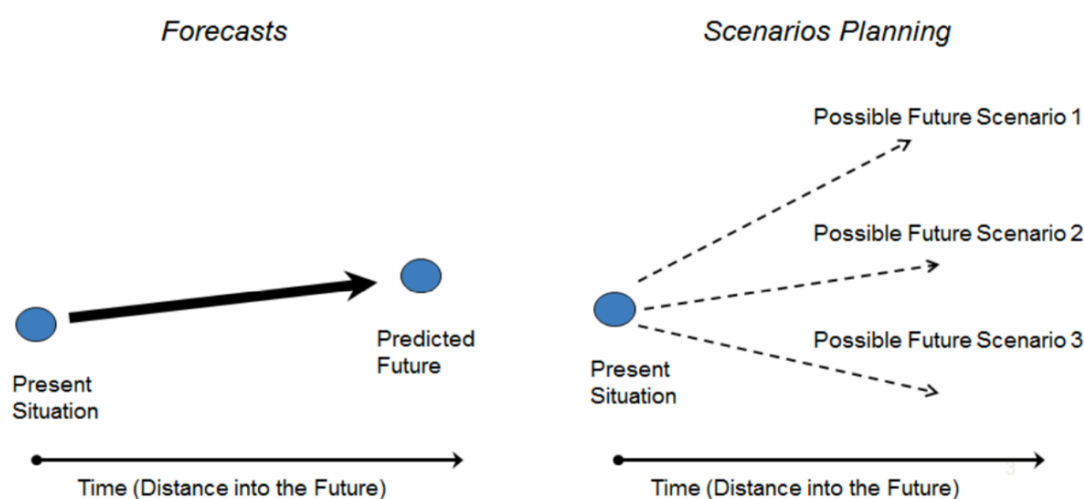


Figura 1.15. Comparació entre la previsió futura d'un punt i la planificació d'escenaris. Font: Dean, 2019

Existeixen dos tipus d'escenaris en funció del tipus de visió, els escenaris convencionals o exploratius i els escenaris normatius.

### - Escenaris exploratius

En un procés típic de planificació d'escenaris, s'esbossen futurs plausibles basats en supòsits sobre la possible evolució dels factors i les condicions actuals (Kosow i Gaßner, 2008; Martelli, 2014). Els escenaris desenvolupats com a resultat del procés es presenten com el context dins del qual opera el sistema i tenen lloc la formulació de polítiques i estratègies (Becker, 1997; Greeuw et al., 2000).

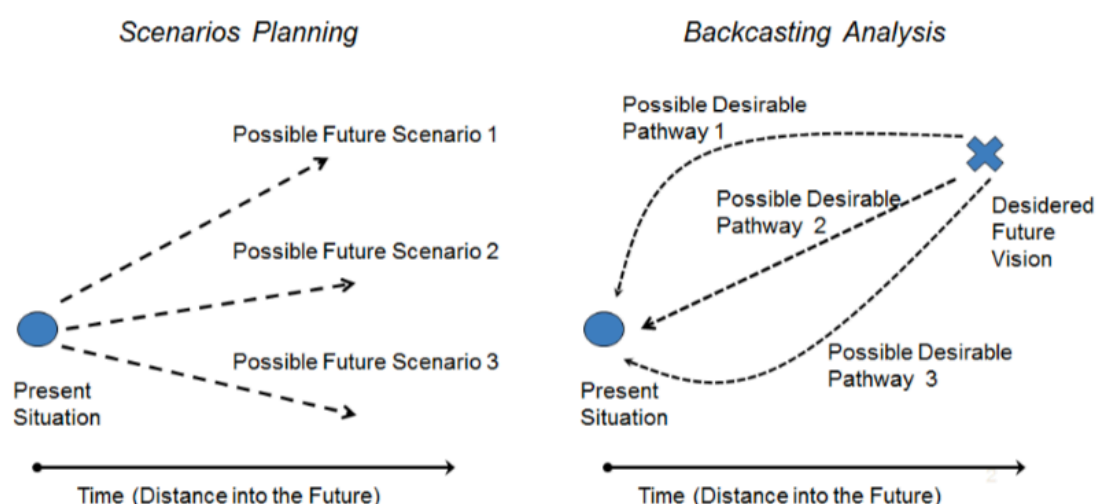


Figura 1.16. Comparació entre la planificació d'escenaris exploratius (*scenarios Planning*) i la planificació d'escenaris normatius (*Backcasting analysis*). Font: Dean, 2019

### - Escenaris normatius

L'enfocament de la planificació d'escenaris normatius té un caràcter ideològic i polític. Planteja una visió desitjada de desenvolupament futur amb l'objectiu d'elaborar estratègies oportunes que puguin conduir des de la situació actual a les condicions futures desitjades (Greeuw et al., 2000; Martelli, 2014). La principal característica distintiva és, doncs, el seu intent d'explorar el futur en termes del que hauria de ser, en lloc del que és probable que sigui i de preocupar-se de la manera com es poden obtenir aquests futurs desitjables (Becker, 1997; Greeuw et al., 2000; Kosow i Gaßner, 2008).

Per tant, si bé un enfocament típic de planificació d'escenaris respon a la pregunta "què pot passar?", una anàlisi d'escenaris normatius tracta qüestions com ara "com volem que sigui el futur?" i "què ha de passar perquè esdevingui realitat?" (Börjeson, Höjer, Dreborg, Ekvall i Finnveden, 2006; Kosow i Gaßner, 2008). La Figura 1.16 i la Taula 1.2 resumeixen les característiques clau de la planificació d'escenaris exploratius i normatius.

	<b>Escenari exploratiu</b>	<b>Escenari normatiu</b>
Qüestions centrals	"Què pot passar?"	"Què hauria de passar i com hi podem arribar?"
Visions filosòfiques	Possibilitat limitada d'influir en les tendències actuals i el desenvolupament futur	La planificació pot canviar el desenvolupament futur
Perspectives	Basat en la incertesa	Basat en el valor
Tipus de futur	Futurs possibles i versemblants	Futurs desitjats
Horitzons de temps	Particularment útil en la perspectiva a mig termini	Particularment útil en la perspectiva a llarg termini
Propòsits	Ajudar a desenvolupar estratègies flexibles i robustes capaces d'afrontar diferents situacions futures possibles	Ajudar a dissenyar visions de desenvolupament desitjades i sostenibles i a identificar estratègies per aconseguir-les
Enfocaments	Descripció de les condicions futures, a partir de la situació actual, basada en la consideració de tendències significatives, incerteses majors i forces motores	Definició d'un futur desitjat i anàlisi de les condicions per què aquest futur es materialitzi

Taula 1.2. Característiques clau dels escenaris exploratius i normatius. Font: Dreborg, 1996; Kosow i Gaßner, 2008; Lindgren i Bandhold, 2002

En aquesta línia, un cop desenvolupat el model socioecològic de la tesi que integri tant els aspectes ambientals com els socioeconòmics (diferents usos del sòl, comportament de la població, dels turistes, entre altres) s'exploraran diferents escenaris futurs modificant diferents variables principalment considerant canvis en els següents aspectes:

- Canvis en el clima

S'analitzarà la projecció futura del recurs hídric a partir de variables climàtiques amb el model RHESSys (Tague i Band, 2004) a nivell de tot Andorra. Aquest punt s'explica en el capítol 3.2.3.

- Canvis en els usos del sòl

En aquest cas s'utilitzarà el criteri expert per analitzar els diferents escenaris plausibles per a Andorra en un futur. Aquest punt s'explica en el capítol 3.2.3.

- Canvis socioeconòmics

Es projectaran diferents escenaris de canvi socioeconòmic modificant variables com poden ser la població, la demanda d'aigua, la producció de neu artificial, els canvis en els hàbits i el comportament de la població, els canvis en les dinàmiques del turisme, entre d'altres. Els escenaris ens permetran analitzar l'efecte d'aquestes variables sobre el recurs hídric així com identificar possibles conflictes sectorials entre la disponibilitat del recurs hídric i la demanda i els futurs usos de l'aigua a Andorra. Aquest punt de la metodologia es detalla en el capítol 5.5.5.

#### **1.6.6. Anàlisi i disseny de polítiques d'adaptació al canvi climàtic i de gestió sostenible del recurs hídric per Andorra**

Finalment, a part de l'interès científic del coneixement generat en les interrelacions i els impactes sobre el recurs hídric i la disponibilitat d'aigua a escala del sistema, els resultats del model integral i dels escenaris generats permetran explorar i avaluar el disseny de polítiques de gestió sostenible de l'aigua i les estratègies d'adaptació al canvi climàtic adaptades als requeriments prioritaris i les especificitats d'Andorra. Per tant, seran una eina de gran utilitat per a l'assoliment de diferents objectius marcats com a prioritari i d'especial interès en l'agenda de l'administració pública i d'altres agents implicats en la gestió de l'aigua al país. Aquest punt de la metodologia s'explica al capítol 6.1.

D'altra banda, també es vol conèixer l'opinió de la població d'Andorra a l'hora d'elaborar estratègies d'adaptació al canvi climàtic a partir de la realització d'una enquesta online. Per tant, per avaluar les millors estratègies d'adaptació al canvi climàtic i de gestió del

recurs hídric es tindrà en compte el treball realitzat amb experts però també l'opinió de la ciutadania. Aquesta informació vindrà a complementar aquest capítol i complementar les modelitzacions. Aquest apartat es detalla al capítol 6.2.

### 1.7. Referències

- Allen, S. K., Bindoff, N. L., Bréon, F.M., Cubasch, U., Myles, R. A., Boucher, O., Hesselbjerg, J., Christensen, Ciais, P., Collins, M., Vasconcellos, V. & Feely, R. A. (2014). Technical Summary. *Climate Change 2013 - The Physical Science Basis*, 31–116. <https://doi.org/10.1017/cbo9781107415324.005>
- Alpert, P., Krichak, S. O., Shafir, H., Haim, D., & Osetinsky, I. (2008). Climatic trends to extremes employing regional modeling and statistical interpretation over the E. Mediterranean. *Global and Planetary Change*, 63(2), 163–170. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2008.03.003>
- Andréassian, V. (2004). Waters and forests: from historical controversy to scientific debate. *Journal of Hydrology*, 291(1), 1–27. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2003.12.015>
- Barceló Pons, B. (1995). Geografia Universal - Andorra. Balears. Catalunya. País Valencià. (Primera ed). Barcelona: Editorial 92.
- Barnett, T. P., Pierce, D. W., Hidalgo, H. G., Bonfils, C., Santer, B. D., Das, T., Bala, G., Wood, A.W., Nozawa, T., Mirin, A. A., Cayan, D.R., Dettinger, M. D. (2008). Human-Induced Changes in the Hydrology of the Western United States. *Science*, 319(5866), 1080 LP – 1083. <https://doi.org/10.1126/science.1152538>
- Batalla, M., Esteban, P., & Ninyerola, M. (2016). L'Atles climàtic digital d'Andorra (ACDA). *Revista del CENMA*, 6–21.
- Batalla, R. J., Gomez, C. M., & Kondolf, G. M. (2004). Reservoir-induced hydrological changes in the Ebro River basin (NE Spain). *Journal of Hydrology*, 290(1–2), 117–



136.

Becker, H. (1997). *Social Impact Assessment*. London: Spon Press.

Beguería, S., López-Moreno, J. I., Gómez-Villar, A., Rubio, V., Lana-Renault, N., & García-Ruiz, J. M. (2006). Fluvial Adjustments to Soil Erosion and Plant Cover Changes in the Central Spanish Pyrenees . *Geografiska Annaler. Series A, Physical Geography*. Oxford, UK : Swedish Society for Anthropology and Geography. <https://doi.org/10.1111/j.1468-0459.2006.00293.x>

Beguería, S., López-Moreno, J. I., Lorente, A., Seeger, M., & García-Ruiz, J. M. (2003). Assessing the effect of climate oscillations and land-use changes on streamflow in the central Spanish Pyrenees. *Ambio*. Sweden. [http://uoc.summon.serialssolutions.com/2.0.0/link/0/eLvHCXMwpV3fb9MwELYYCMELYoXBGEh-QqAqU-JLE-eBhxWK-DEk0DbEWxXblxGpTaZt1TTes6\\_mgoJB0llraw4rXrnr-fzd98xBmI\\_TX7BhCytMTOqqjQWGkyjllGqmcCkybJCSXTpj\\_zjofwylV-Hrneu2KT37b7o9b8tTGNkY1sx-w9WXj-UBug92ZquZG26\\_pW9\\_el](http://uoc.summon.serialssolutions.com/2.0.0/link/0/eLvHCXMwpV3fb9MwELYYCMELYoXBGEh-QqAqU-JLE-eBhxWK-DEk0DbEWxXblxGpTaZt1TTes6_mgoJB0llraw4rXrnr-fzd98xBmI_TX7BhCytMTOqqjQWGkyjllGqmcCkybJCSXTpj_zjofwylV-Hrneu2KT37b7o9b8tTGNkY1sx-w9WXj-UBug92ZquZG26_pW9_el)

Beguería, S., Sánchez-Pérez, J. M., Antigüedad, I., Caballero, Y., Lambán, L. J., Quintana-Seguí, P., Llasat, C., Pesado, C., Vidal, J. P. & Jódar, J. (2019). Evaluation of water resources of the Pyrenees in a context of climate change and adaptation strategies. *Geophysical Research Abstracts*, 21(April), 1. <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=asn&AN=140494002&site=ehost-live>

Beniston, M. (2003). Climatic Change in Mountain Regions: A Review of Possible Impacts. *Climatic Change*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. <https://doi.org/10.1023/A:1024458411589>

Beniston, M. (2005). Mountain climates and climatic change: An overview of processes focusing on the European Alps. *Pure and Applied Geophysics*, 162(8–9), 1587–1606. <https://doi.org/10.1007/s00024-005-2684-9>

Beniston, M. (2012). Impacts of climatic change on water and associated economic activities in the Swiss Alps. *Journal of Hydrology*, 412–413, 291–296. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.06.046>

Börjeson, L., Höjer, M., Dreborg, K.-H., Ekvall, T., & Finnveden, G. (2006). Scenario types and techniques: towards a user's guide. *Futures*, 38(7), 723–739.

Bradley, R. S., Vuille, M., Diaz, H. F., & Vergara, W. (2006). Threats to water supplies in

- the tropical Andes. *Science*, 312(5781), 1755–1756.
- Brunetti, M., Buffoni, L., Mangianti, F., Maugeri, M., & Nanni, T. (2004). Temperature, precipitation and extreme events during the last century in Italy. *Global and Planetary Change*. Elsevier B.V. [https://doi.org/10.1016/S0921-8181\(03\)00104-8](https://doi.org/10.1016/S0921-8181(03)00104-8)
- Caballero, Y., Voirin-Morel, S., Habets, F., Noilhan, J., LeMoigne, P., Lehenaff, A., & Boone, A. (2007). Hydrological sensitivity of the Adour-Garonne river basin to climate change. *Water Resources Research*, 43(7).
- Calder, I. R. (2007). Forests and water—Ensuring forest benefits outweigh water costs. *Forest Ecology and Management*. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.06.015>
- Carrivick, J. L., & Brewer, T. R. (2004). Improving Local Estimations and Regional Trends of Glacier Equilibrium Line Altitudes. *Geografiska Annaler. Series A, Physical Geography*. Oxford, UK: Swedish Society for Anthropology and Geography. <https://doi.org/10.1111/j.0435-3676.2004.00214.x>
- Census, U. S. B. of T. (2000). International data base. US Bureau of the Census Washington, DC.
- Christensen, N. S., & Lettenmaier, D. P. (2007). A multimodel ensemble approach to assessment of climate change impacts on the hydrology and water resources of the Colorado River Basin. *Hydrology and Earth System Sciences. Copernicus Publications*. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1417-2007>
- Cosandey, C., Andréassian, V., Martin, C., Didon-Lescot, J. F., Lavabre, J., Folton, N., Mathys, N., Richard, D. (2005). The hydrological impact of the mediterranean forest: a review of French research. *Journal of Hydrology*. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.06.040>
- Crowley, T. J. (2000). Causes of climate change over the past 1000 years. *Science*, 289(5477), 270–277.
- Crutzen, P. J. (2002). The “anthropocene.” In *Journal de Physique IV (Proceedings)* (Vol. 12, pp. 1–5). EDP sciences.
- Daily, G. C. (1995). Restoring value to the world’s degraded lands. *Science*, 269(5222), 350–354.
- David, T. S., Gash, J. H. C., Valente, F., Pereira, J. S., Ferreira, M. I., & David, J. S. (2006). Rainfall interception by an isolated evergreen oak tree in a Mediterranean savannah. *Hydrological Processes*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd.

<https://doi.org/10.1002/hyp.6062>

Dawadi, S., & Ahmad, S. (2012). Changing climatic conditions in the Colorado River Basin: Implications for water resources management. *Journal of Hydrology*, 430–431, 127–141. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.02.010>

Dean, M. (2019). Scenario Planning: A Literature Review. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.12629.24802>

Diaz, H. F., Eischeid, J. K., Duncan, C., & Bradley, R. S. (2003). Variability of Freezing Levels, Melting Season Indicators, and Snow Cover for Selected High-Elevation and Continental Regions in the Last 50 Years. *Climatic Change*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. <https://doi.org/10.1023/A:1024460010140>

Dreborg, K. H. (1996). Essence of backcasting. *Futures*, 28(9), 813–828.

Esteban, P., Jones, P. D., Martín-Vide, J., & Mases, M. (2005). Atmospheric circulation patterns related to heavy snowfall days in Andorra, Pyrenees. *International Journal of Climatology*, 25(3), 319–329. <https://doi.org/10.1002/joc.1103>

Esteban Vea, P., Prohom Duran, M., & Aguilar, E. (2012). Tendencias recientes e índices de cambio climático de la temperatura y la precipitación en Andorra, Pirineos (1935-2008). *Pirineos*, 167(0), 87–106. <https://doi.org/10.3989/Pirineos.2012.167005>

Evans, J. P. (2009). 21st century climate change in the Middle East. *Climatic Change*. Dordrecht: Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/s10584-008-9438-5>

Fleig, A. K., Tallaksen, L. M., Hisdal, H., & Hannah, D. M. (2011). Regional hydrological drought in north-western Europe: linking a new Regional Drought Area Index with weather types. *Hydrological Processes*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/hyp.7644>

Frederick, K. D. (1997). Adapting to Climate Impacts on the Supply and Demand for Water. *Climatic Change*, 37(1), 141–156. <https://doi.org/10.1023/A:1005320504436>

Gallart, F., & Llorens, P. (2004). Observations on land cover changes and water resources in the headwaters of the Ebro catchment, Iberian Peninsula. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 29(11–12), 769–773. <https://doi.org/10.1016/J.PCE.2004.05.004>

García-Ruiz, J. M., & Lana-Renault, N. (2011b). Hydrological and erosive consequences of farmland abandonment in Europe, with special reference to the Mediterranean

- region – A review. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. Elsevier B.V.  
<https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.01.003>
- García-Ruiz, J. M., López-Moreno, J. I., Vicente-Serrano, S. M., Lasanta-Martínez, T., & Beguería, S. (2011a). Mediterranean water resources in a global change scenario. *Earth-Science Reviews*, 105(3–4), 121–139.  
<https://doi.org/10.1016/J.EARSCIREV.2011.01.006>
- García-Ruiz, J. M., Regüés, D., Alvera, B., Lana-Renault, N., Serrano-Muela, P., Nadal-Romero, E., Navas, A., Latron, J., Martí-Bono, C. & Arnáez, J. (2008). Flood generation and sediment transport in experimental catchments affected by land use changes in the central Pyrenees. *Journal of Hydrology*. Elsevier B.V.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.04.013>
- García-Vera, M. Á. (2013). The application of hydrological planning as a climate change adaptation tool in the Ebro basin. *International Journal of Water Resources Development*, 29(2), 219–236. <https://doi.org/10.1080/07900627.2012.747128>
- Gibelin, A.-L., & Déqué, M. (2003). Anthropogenic climate change over the Mediterranean region simulated by a global variable resolution model. *Climate Dynamics*. Berlin/Heidelberg : Springer-Verlag . <https://doi.org/10.1007/s00382-002-0277-1>
- Giorgi, F. (2006). Climate change hot-spots. *Geophysical Research Letters*, 33(8), 1–4.  
<https://doi.org/10.1029/2006GL025734>
- Giorgi, F, Bi, X., & Pal, J. S. (2004). Mean, interannual variability and trends in a regional climate change experiment over Europe. I. Present-day climate (1961–1990). *Climate Dynamics*. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag.  
<https://doi.org/10.1007/s00382-004-0409-x>
- Giorgi, F., & Lionello, P. (2008). Climate change projections for the Mediterranean region. *Global and Planetary Change*. Elsevier B.V.  
<https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.09.005>
- Goubanova, K., & Li, L. (2007). Extremes in temperature and precipitation around the Mediterranean basin in an ensemble of future climate scenario simulations. *Global and Planetary Change*. Elsevier B.V.  
<https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.11.012>
- Govern d'Andorra. (2007). Les aigües subterrànies del Principat d'Andorra.  
<https://www.mediambient.ad/images/stories/PDF/aigua/Cap1-Meteorologia->

balanc-hidric.pdf

Govern d'Andorra. (2014). Procés d'adaptació d'Andorra al canvi climàtic (PAACC). [https://www.mediambient.ad/images/stories/PDF/PAACC/ProcesAdaptacioAndorra\\_CC2014.pdf](https://www.mediambient.ad/images/stories/PDF/PAACC/ProcesAdaptacioAndorra_CC2014.pdf)

Govern d'Andorra. (2019a). Ministeri de Medi Ambient i Sostenibilitat. Aigua - El recurs. <https://www.mediambient.ad/el-recurs>

Govern d'Andorra. (2019b). Troisième Rapport Bisannuel à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC). <https://www.mediambient.ad/images/stories/CanviClimatic/CanviClimatic-AndorreCClimatiques.pdf>

Govern d'Andorra. (2020a). Departament d'Estadística. Demografia i població. <https://www.estadistica.ad/serveiestudis/web/index.asp>

Govern d'Andorra. (2020b). Les aigües superficials. <https://www.mediambient.ad/les-aigues-superficials>

Govern d'Andorra. (2020c). Ministeri de Medi Ambient i Sostenibilitat. Aigua - La despesa hídrica. <https://www.mediambient.ad/la-despesa-hidrica>

Grant, R. M. (2003). Strategic planning in a turbulent environment: Evidence from the oil majors. *Strategic Management Journal*, 24(6), 491–517.

Gray, M. (2001). Glaciers and environmental change. A. Nesje and S.V. Dahl. Publisher Arnold, London 2000 (203 pp) ISBN 0-340-70637-6 ;ISBN 0-340-70634-1. *Journal of Quaternary Science*. <https://doi.org/10.1002/jqs.601>

Greeuw, S. C. H., van Asselt, M. B. A., Grosskurth, J., Storms, C., Rijkens-Klomp, N., Rothman, D. S., Rotmans, J., Ribeiro, T. (2000). Cloudy crystal balls. *European Environment Agency, Copenhagen, Denmark*.

Haro-Monteagudo, D., Palazón, L., & Beguería, S. (2020). Long-term sustainability of large water resource systems under climate change: A cascade modeling approach. *Journal of Hydrology*, 582, 124546. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124546>

IPCC. (2014). Climate Change 2014: Synthesis Report. *Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Vol. 9781107025)*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139177245.003>

Kabat, P., Claussen, M., Dirmeyer, P. A., Gash, J. H. C., de Guenni, L. B., Meybeck, M., Hutjes, R.W. A., Pielke Sr, R. A., Vorosmarty, C. J. & Lütkeemeier, S. (2004). Vegetation, water,

- humans and the climate: A new perspective on an interactive system. *Springer Science & Business Media*.
- Keeling, C D, & Whorf, T. P. (2000). Atmospheric CO<sub>2</sub> records from sites in the SIO air sampling network, in, Trends, Dept. *Energy, Oak Ridge, TN*.
- Keeling, Charles D, Whorf, T. P., Wahlen, M., & Van der Plichtt, J. (1995). Interannual extremes in the rate of rise of atmospheric carbon dioxide since 1980. *Nature*, 375(6533), 666–670.
- Klein Goldewijk, K., & Battjes, J. J. (1997). One hundred year database for integrated environmental assessments. *National Institute for Public Health and the Environment (RIVM), Bilthoven, Netherlands*.
- Kosow, H., & Gaßner, R. (2008). *Methods of future and scenario analysis: overview, assessment, and selection criteria* (Vol. 39). DEU.
- Le Treut, H. (2013). Impacts du changement climatique en Aquitaine.
- Lepinas, F., Ludwig, W., & Heussner, S. (2010). Impact of recent climate change on the hydrology of coastal Mediterranean rivers in Southern France. *Climatic Change*, 99(3), 425–456. <https://doi.org/10.1007/s10584-009-9668-1>
- Lindgren, M., & Bandhold, H. (2002). *Scenario Planning: The link between future and strategy*. Palgrave Macmillan.
- Liuzzo, L., Noto, L., Vivoni, E., & La Loggia, G. (2010). Basin-Scale Water Resources Assessment in Oklahoma under Synthetic Climate Change Scenarios Using a Fully Distributed Hydrologic Model. *Journal of Hydrologic Engineering*, 15(2), 107–122. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000166](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000166)
- Llabrés-Brustenga, A., Prohom, M., Cunillera, J., Cuadrat, J. M., Serrano-notivoli, R., & Saz, M. Á. (2019). Observed trends and changes in Extreme Climate Indices over the Pyrenees ( 1959-2015 ), (September), 1–2.
- Llorens, P., & Domingo, F. (2007). Rainfall partitioning by vegetation under Mediterranean conditions. A review of studies in Europe. *Journal of Hydrology*. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.10.032>
- López-Moreno, J. I., Beniston, M., & García-Ruiz, J. M. (2008a). Environmental change and water management in the Pyrenees: Facts and future perspectives for Mediterranean mountains. *Global and Planetary Change*, 61(3–4), 300–312. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.10.004>
- López-Moreno, J. I., & García-Ruiz, J. M. (2004). Influence of snow accumulation and

- snowmelt on streamflow in the central Spanish Pyrenees/Influence de l'accumulation et de la fonte de la neige sur les écoulements dans les Pyrénées centrales espagnoles. *Hydrological Sciences Journal*, 49(5). <https://doi.org/10.1623/hysj.49.5.787.55135>
- López-Moreno, J. I., Vicente-Serrano, S. M., Zabalza, J., Beguería, S., Lorenzo-Lacruz, J., Azorin-Molina, C., & Morán-Tejeda, E. (2013). Hydrological response to climate variability at different time scales: A study in the Ebro basin. *Journal of Hydrology*, 477, 175–188. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.11.028>
- López-Moreno, J. I., Zabalza, J., Vicente-Serrano, S. M., Revuelto, J., Gilaberte, M., Azorin-Molina, C., Morán-Tejeda, E., García-Ruiz, J.M. & Tague, C. (2014). Impact of climate and land use change on water availability and reservoir management: Scenarios in the Upper Aragón River, Spanish Pyrenees. *Science of The Total Environment*, 493, 1222–1231. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2013.09.031>
- López-Moreno, J I. (2005). Recent Variations of Snowpack Depth in the Central Spanish Pyrenees. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 37(2), 253–260. [https://doi.org/10.1657/1523-0430\(2005\)037\[0253:RVOSDI\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1657/1523-0430(2005)037[0253:RVOSDI]2.0.CO;2)
- López-Moreno, J I, & Latron, J. (2008b). Influence of canopy density on snow distribution in a temperate mountain range. *Hydrological Processes*. <https://doi.org/10.1002/hyp.6572>
- López-Moreno, J I, Vicente-Serrano, S. M., Moran-Tejeda, E., Zabalza, J., Lorenzo-Lacruz, J., & García-Ruiz, J. M. (2011). Impact of climate evolution and land use changes on water yield in the ebro basin . *Hydrology and Earth System Sciences*. Katlenburg-Lindau : Copernicus GmbH. <https://doi.org/10.5194/hess-15-311-2011>
- López-Moreno, Juan Ignacio, Beguería, S., & García-Ruiz, J. M. (2006). Trends in high flows in the central Spanish Pyrenees: response to climatic factors or to land-use change? *Hydrological Sciences Journal*, 51(6), 1039–1050.
- López, R., & Justribó, C. (2010). The hydrological significance of mountains: a regional case study, the Ebro River basin, northeast Iberian Peninsula. *Hydrological Sciences Journal*. Taylor & Francis. <https://doi.org/10.1080/02626660903546126>
- Lorenzo-Lacruz, J., Vicente-Serrano, S. M., López-Moreno, J. I., Beguería, S., García-Ruiz, J. M., & Cuadrat, J. M. (2010). The impact of droughts and water management on various hydrological systems in the headwaters of the Tagus River (central Spain). *Journal of Hydrology*, 386(1–4), 13–26. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2010.01.001>

- Lorenzo-Lacruz, J., Vicente-Serrano, S. M., López-Moreno, J. I., Morán-Tejeda, E., & Zabalza, J. (2012). Recent trends in Iberian streamflows (1945–2005). *Journal of Hydrology*, 414–415, 463–475. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2011.11.023>
- Mann, M. E., Bradley, R. S., & Hughes, M. K. (1999). Northern hemisphere temperatures during the past millennium: Inferences, uncertainties, and limitations. *Geophysical Research Letters*, 26(6), 759–762.
- Martelli, A. (2014). Models of scenario building and planning: Facing uncertainty and complexity. *Springer*.
- Mas-Pla, J. (2010). Vulnerabilitat territorial dels recursos hidrològics al canvi climàtic. *Segon Informe Sobre El Canvi Climàtic a Catalunya*. Publicació Del CADS-IEC, 309–342.
- McCarthy, J. J., Canziani, O. F., Leary, N. A., Dokken, D. J., & White, K. S. (2001). *Climate change 2001: impacts, adaptation, and vulnerability: contribution of Working Group II to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Vol. 2). Cambridge University Press.
- McDonnell, J. J., McGuire, K., Aggarwal, P., Beven, K. J., Biondi, D., Destouni, G., Dunn, S., James, A., Kirchner, J., Kraft, P., Lyon, S., Maloszewski, P., Newman, B., Pfister, L., Rinaldo, A., Rodhe, A., Sayama, T., Seibert, J., Solomon, K., Soulsby, C., Stewart, M., Tetzlaff, D., Tobin, C., Troch, P., Weiler, M., Western, A., Wörmann, A., Wrede, S. (2010). How old is streamwater? Open questions in catchment transit time conceptualization, modelling and analysis. *Hydrological Processes*. <https://doi.org/10.1002/hyp.7796>
- McNeill, J. R. (2001). *Something new under the sun: An environmental history of the twentieth-century world (the global century series)*. WW Norton & Company.
- MEDACC (2013-2019). Mediterranean Adaptation to Climate Change. <http://medacc-life.eu/es>
- Morán-tejeda, E., Zabalza, J., Rahman, K., Gago-silva, A., López-moreno, J. I., Vicente-Serrano, S., Lehmann, A., Tague, C., Beniston, M. (2014). Hydrological impacts of climate and land-use changes in a mountain watershed : uncertainty estimation based on model comparison. *Ecohydrology*, 8, 1396–1416. <https://doi.org/10.1002/eco.1590>
- National Research Council. (2000). *Global Change Ecosystems Research*. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/9983>
- NOAA. (2020). Global Monitoring Laboratory Earth System Research Laboratories.



- <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>
- Nogués-Bravo, D., Araújo, M. B., Errea, M. P., & Martínez-Rica, J. P. (2007). Exposure of global mountain systems to climate warming during the 21st Century. *Global Environmental Change*, 17(3–4), 420–428. <https://doi.org/10.1016/J.GLOENVCHA.2006.11.007>
- Nordhaus, W. (1997). Do real wage and output series capture reality? The history of lighting suggests not. *The Economics of New Goods*. Chicago: University of Chicago Press.
- OMA (2019). Clima - Tendències. <http://www.oma.ad/ca/tendencias>
- Parajuli, P. B. (2010). Assessing sensitivity of hydrologic responses to climate change from forested watershed in Mississippi. *Hydrological Processes*, 24(26), 3785–3797.
- Peterson, G. D., Cumming, G. S., & Carpenter, S. R. (2003). Scenario planning: a tool for conservation in an uncertain world. *Conservation Biology*, 17(2), 358–366.
- Pons, M., López Moreno, J. I., Esteban Vea, P., Macià, S., Gavalda, J., García Olalia, C., Rosas Casals, M. & Jover, E. (2014). Climate change influence on winter tourism in the Pyrenees. Experience from the NIVOPYR. *Pirineos*, 169(169), 1–12. <https://doi.org/doi: http://dx.doi.org/10.3989/Pirineos.2014.169006>
- Pons, M. (2017). Informe sobre els Escenaris de Canvi Climàtic a Andorra.
- Pons, M., Johnson, P. A., Rosas-Casals, M., Sureda, B., & Jover, È. (2012). Modeling climate change effects on winter ski tourism in Andorra. *Climate Research*, 54(3), 197–207. <https://doi.org/10.3354/cr01117>
- Quintana-Seguí, P., Ribes, A., Martin, E., Habets, F., & Boé, J. (2010). Comparison of three downscaling methods in simulating the impact of climate change on the hydrology of Mediterranean basins. *Journal of Hydrology*, 383(1–2), 111–124.
- Ragab, R., & Prudhomme, C. (2002). SW—Soil and Water: Climate Change and Water Resources Management in Arid and Semi-arid Regions: Prospective and Challenges for the 21st Century. *Biosystems Engineering*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1006/bioe.2001.0013>
- Ranzi, R., Boichichio, M., & Bacchi, B. (2002). Effects on floods of recent afforestation and urbanisation in the Mella River (Italian Alps). *Hydrology and Earth System Sciences*. Copernicus Publications. <https://doi.org/10.5194/hess-6-239-2002>
- Reynaud, A., Pons, M., & Pesado, C. (2018). Household Water Demand in Andorra: Impact of Individual Metering and Seasonality. *Water*, 10(3), 321.

<https://doi.org/10.3390/w10030321>

- Schoemaker, P. (1995). Scenario Planning: A Tool for Strategic Thinking. *Sloan Management*, 37(No. 2), 25–40.
- Schoemaker, P. (2016). The Palgrave Encyclopedia of Strategic Management. *The Palgrave Encyclopedia of Strategic Management*. <https://doi.org/10.1057/978-1-349-94848-2>
- Schwartz, P. (1996). The Art of the Long View: Planning for the Future in an Uncertain World. *Doubleday*.
- Senatore, A., Mendicino, G., Smiatek, G., & Kunstmann, H. (2011). Regional climate change projections and hydrological impact analysis for a Mediterranean basin in Southern Italy. *Journal of Hydrology*, 399(1–2), 70–92.
- Smithson, P. A. (2001). IPCC, 2001: climate change 2001: the scientific basis. Contribution of Working Group 1 to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by JT Houghton, Y. Ding, DJ Griggs, M. Noguer, PJ van der Linden, X. Dai, K. Mas. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 22(9), 1144.
- Steffen, W., Sanderson, R. A., Tyson, P. D., Jäger, J., Matson, P. A., Moore III, B., Oldfield, F., Richardson, K., Schellnhuber, H. J. & Turner, B. L. (2006). Global change and the earth system: a planet under pressure. *Springer Science & Business Media*.
- Stockholm Environment Institute (SEI), U. S. C. (2020). WEAP. <https://www.sei.org/projects-and-tools/tools/weap/>
- Tague, C. L., & Band, L. E. (2004). RHESys : Regional Hydro-Ecologic Simulation System — An Object- Oriented Approach to Spatially Distributed Modeling of Carbon, Water, and Nutrient Cycling. *Earth Interactions*, 8(19), 1–42.
- Tague, C., & Peng, H. (2013). The sensitivity of forest water use to the timing of precipitation and snowmelt recharge in the California Sierra: Implications for a warming climate. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 118(2), 875–887.
- Tong, S. T. Y., Sun, Y., Ranatunga, T., He, J., & Yang, Y. J. (2012). Predicting plausible impacts of sets of climate and land use change scenarios on water resources. *Applied Geography*, 32(2), 477–489.
- UNEP (2000). Global environmental outlook 2000. United Nations Environmental Program London.
- Van der Heijden, K. (2005). Scenarios : The Art of Strategic Conversation. *John Wiley &*

*Sons Ltd.*

- Vicente-Serrano, S. M., Lasanta, T., & Romo, A. (2004). Analysis of Spatial and Temporal Evolution of Vegetation Cover in the Spanish Central Pyrenees: Role of Human Management. *Environmental Management*. New York: Springer New York. <https://doi.org/10.1007/s00267-003-0022-5>
- Vitousek, P. M. (1994). Beyond global warming: ecology and global change. *Ecology*, 75(7), 1861–1876.
- Viviroli, D., Dürr, H. H., Messerli, B., Meybeck, M., & Weingartner, R. (2007). Mountains of the world, water towers for humanity: Typology, mapping, and global significance. *Water Resources Research*. American Geophysical Union. <https://doi.org/10.1029/2006WR005653>
- Viviroli, D., Weingartner, R., & Messerli, B. (2003). Assessing the Hydrological Significance of the World's Mountains. *Mountain Research and Development*, 23(1), 32–40. [https://doi.org/10.1659/0276-4741\(2003\)023\[0032:athsot\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1659/0276-4741(2003)023[0032:athsot]2.0.co;2)
- Vörösmarty, C. J., & Sahagian, D. (2000). Anthropogenic disturbance of the terrestrial water cycle. *Bioscience*, 50(9), 753–765.
- Wack, P. (1985). Scenarios: Shooting the Rapids. *Harvard Business Review*, 63(No. 6), 139–150.
- Warburton, M. L., Schulze, R. E., & Jewitt, G. P. W. (2012). Hydrological impacts of land use change in three diverse South African catchments. *Journal of Hydrology*. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.10.028>
- Weatherhead, E. K., & Howden, N. J. K. (2009). The relationship between land use and surface water resources in the UK. *Land Use Policy*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2009.08.007>
- Zabalza-Martínez, J., Vicente-Serrano, S. M., López-Moreno, J. I., Borràs Calvo, G., Savé, R., Pascual, D., Pla, E., Morán-Tejeda, E., Domínguez-Castro, F. & Tague, C. L. (2018). The Influence of Climate and Land-Cover Scenarios on Dam Management Strategies in a High Water Pressure Catchment in Northeast Spain. *Water*, 10, 1668, 1–23. <https://doi.org/10.3390/w10111668>
- Zabalza, J., National, S., Vicente-Serrano, S. M., i National, S. (2017). The influence of climate and land-cover scenarios on dam management strategies in a high water pressure catchment in North-east Spain, (January 2018). <https://doi.org/10.3390/CHyCle-2017-04878>

## **2. CARACTERITZACIÓ HIDROLÒGICA A ANDORRA I LA SEVA TENDÈNCIA CLIMÀTICA**

---

**2.1. Caracterització històrica del balanç hídric a Andorra**

**2.2. Caracterització històrica dels cabals observats**

**2.3. Anàlisi de tendències de cabals al Pirineu**

**2.3.1. Anàlisi de tendències de cabal a Andorra**

**2.4. Punts clau del capítol**

**2.5. Referències**

## **2. CARACTERITZACIÓ DEL RECURS HÍDRIC A ANDORRA I LA SEVA TENDÈNCIA CLIMÀTICA**

---

### **2.1. Caracterització històrica del balanç hídric a Andorra**

El recurs hídric d'una conca és la quantitat d'aigua disponible per a l'ús dels humans o dels ecosistemes. Aquest recurs és necessari per a la vida i les activitats humanes, però és limitat, per tant, és important conèixer les reserves d'aigua que tenim per a poder fer-ne una bona gestió. El balanç hídric calcula la quantitat d'aigua que resta en un territori considerant que una part prové de les precipitacions i en funció de les condicions climàtiques, s'evapotranspira (evaporació i transpiració dels vegetals), s'infiltra en el sòl, recarrega els nivells aquífers i posteriorment alimenta les aigües superficials i en menys proporció s'escola de forma directa sobre el sòl (Govern d'Andorra, 2019). Les zones de muntanya són la principal font d'aigua de molts rius i es comporten com a veritables col·lectors d'aigua que recarreguen posteriorment les conques avall. El ministeri de Medi Ambient del Govern d'Andorra quantifica el recurs hídric mitjà disponible anualment a partir del balanç hídric. Per al càlcul del balanç hídric tenen en compte les dades de precipitacions mensuals, de temperatura màxima i mínima diària per quantificar el recurs hídric mitjà disponible. Aquestes dades les facilita el Centre d'estudis de la neu i la muntanya d'Andorra de l'Institut d'estudis Andorrans (CENMA-IEA).

Estacions	Latitud	Longitud	Font
Sorteny	382802,03	4718685,05	CENMA
Perafita	383572,98	4702815,01	CENMA
Aixàs	374833,03	4704617,99	CENMA
Bony Neres	383729,03	4711762,97	CENMA
Central	381189,762	4708044,678	FEDA
Ransol	388345,799	4714928,938	FEDA
Roc Sant Pere			Govern d'Andorra
Borda Vidal			Govern d'Andorra
La Comella			Govern d'Andorra
Les Salines			Govern d'Andorra
Hospitalet prè l'Andorre			Météo France

Taula 2.1. Estacions meteorològiques d'Andorra utilitzades per l'anàlisi del balanç hídric. Font: elaboració pròpia

Del 2006 i fins al 2012, s'ha realitzat l'estudi anyal del balanç hídric mitjançant l'estimació per gradients constants. A partir del 2012, es realitza l'estudi mitjançant la metodologia de regressió múltiple (Govern d'Andorra, 2020).

En la Taula 2.1 i la Figura 2.1 es pot observar les estacions meteorològiques utilitzades per realitzar mensualment els mapes de temperatura i precipitació que serveixen com a base pel càlcul del balanç hídric, així com la seva situació i la font de les dades.



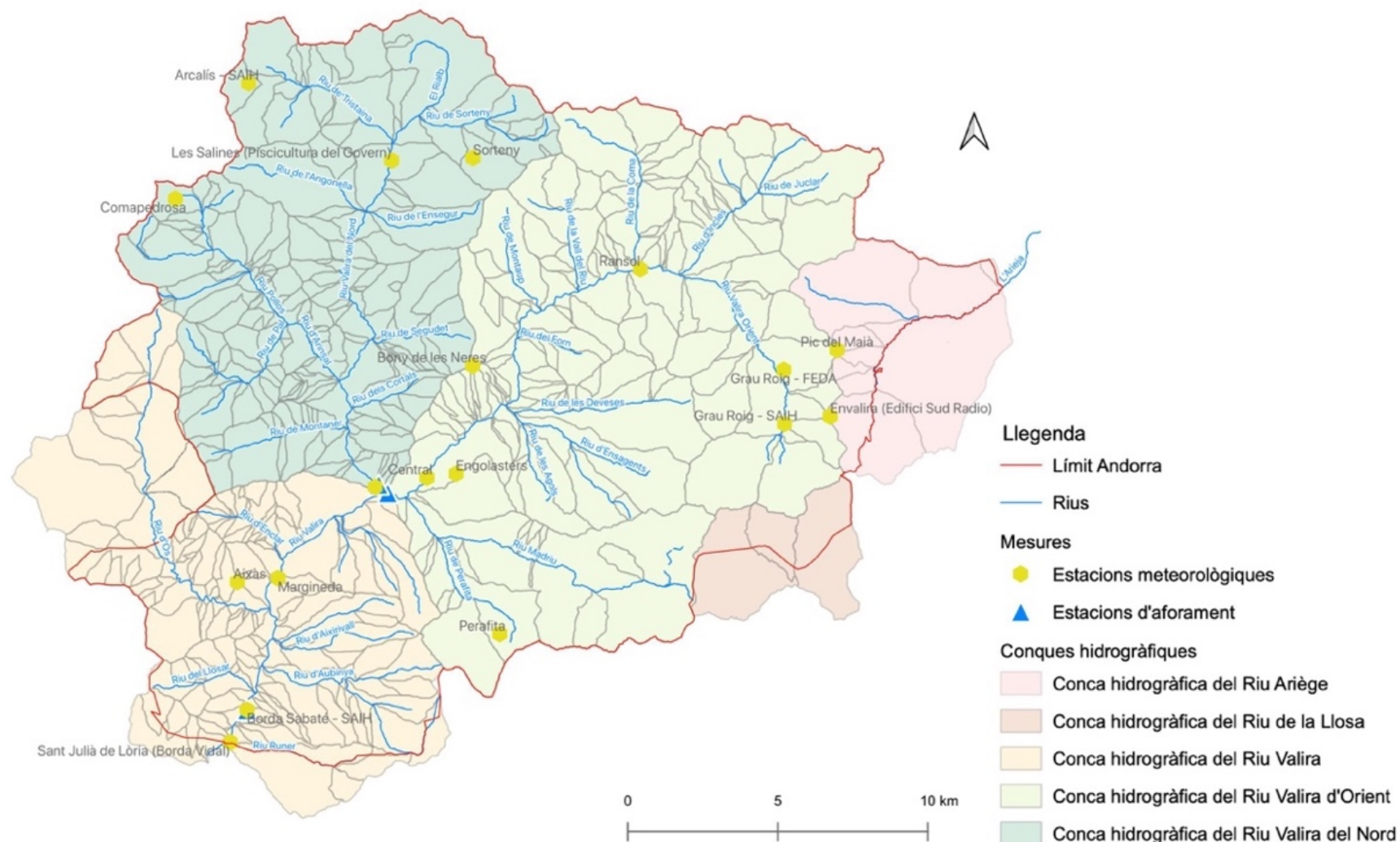


Figura 2.1. Mapa de la situació de les estacions meteorològiques i d'aforament. Font: elaboració pròpia

L'estimació del recurs hídric que realitza el Govern d'Andorra (Govern d'Andorra, 2018) pel càlcul del balanç hídric es basa en l'expressió següent:

$$P = ETR + Pu \pm \Delta R$$

on:

P= Precipitació total, sòlida i líquida

ETR= Evapotranspiració real

Pu=Pluja efectiva o excedents

$\Delta R$ =Variació de la reserva d'aigua en el sòl (aquesta dada l'obtenen directament en el model)

	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
T mitjana (°C)	5,29	4,18	5,53	6,03	5,33	5,65	5,06
Precipitació acumulada (mm)	739,79	1031,85	1179,54	1015	1021,63	1034,73	1160,4
ETR (mm)	304,19	361,82	473,2	478,27	378	428	435
Pluja efectiva (excedents, en mm) (467 km <sup>2</sup> )		670,29	706,35	539,48	646,	606	726
$\Delta R^*$ (mm)	8,6	8,6	8,3	1,9	3,7	2,7	-1,5

Taula 2.2. Resum balanç hídric anual en base al mètode de Thornthwaite. (\*)  $\Delta R$  dada obtinguda directament del model. Font: Govern d'Andorra, 2018

Quan es parla de pluja efectiva s'està parlant de l'aigua que surt com a escolament superficial directe i com a escolament subterrani, que en un balanç anual es pot interpretar que tota la pluja efectiva acaba drenant cap als rius. Per estimar la pluja efectiva s'utilitza el mètode de Thornthwaite per la simplicitat del càlcul de l'evapotranspiració i les dades disponibles (veure les dades calculades en la Taula 2.2). Es tracta d'un mètode empíric i pràctic per realitzar càlculs de balanços anuals i mensuals d'aigua i àmpliament utilitzat al Pirineu. Aquest mètode aporta valors acceptables en zones més o menys humides però no funciona bé en les zones àrides o semiàrides (Govern d'Andorra, 2019).



<b>Recurs hídric (hm<sup>3</sup>/any)</b>	<b>2012</b>	<b>2013</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>	<b>2018</b>
Recurs hídric fruit de la pluja efectiva (excedents)	203,01	313,03	329,86	253,34	302,00	283	339,4
Recurs hídric disponible (menys cabals ecològics excedents)	182,71	281,72	296,88	228,01	272	255	305,5

Taula 2.3. Dades de balanç hídric calculades pel Govern d'Andorra repartit en el territori Andorrà (467 km<sup>2</sup>). Font: Govern d'Andorra, 2018

La Taula 2.3 i la Figura 2.2 mostren les dades de recurs hídric calculades a partir de la pluja efectiva repartit entre el territori andorrà (467 km<sup>2</sup>). La pluja efectiva estimada mitja del 2018 representa uns 339,4 hm<sup>3</sup>/any. D'aquests, 305,5 hm<sup>3</sup>/any estarien disponibles, reservant el 10 % com a cabals ecològics per al 2018.

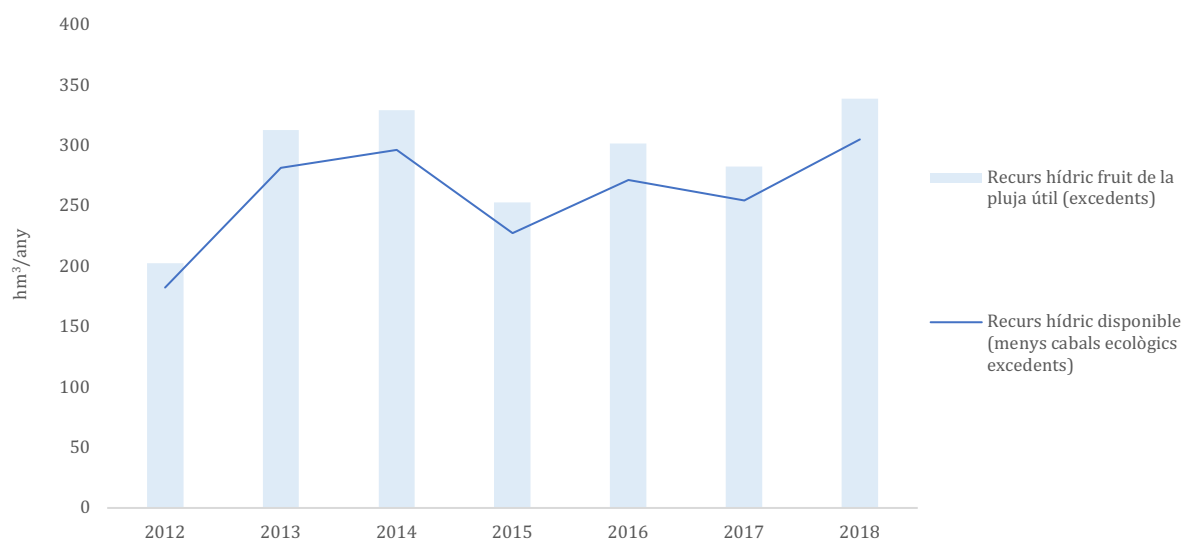


Figura 2.2. Recurs hídric anual (hm<sup>3</sup>/any) pel Principat d'Andorra. Font: elaboració pròpia a partir de dades de l'informe de Govern d'Andorra, 2018

No es disposa de series llargues que permetin detectar una tendència clara però si es pot observar una variabilitat anual marcada per la pròpia variabilitat climàtica regional on s'alternen mínims de cabal com l'any 2012 amb 200 hm<sup>3</sup>/anuals i el 2015 amb 250 hm<sup>3</sup>/anuals amb màxims com l'any 2014 amb 330 hm<sup>3</sup>/anuals i el 2018 amb 340 hm<sup>3</sup>/anuals.

Finalment comparen els resultats obtinguts del càlcul del recurs hídric a partir del mètode Thornthwaite amb els cabals observats de les estacions d'aforament del Gran

Valira (considera el cabal de l'estació d'aforament de Borda Sabater i la sortida del cabal de la EDAR Sud) i del Valira del Nord (estació d'aforament del Pont d'Escaldes). Aquestes dades mostren una variació del cabal del 37 % per la conca del Gran Valira i del 57 % pel Valira del Nord, per tant, aquest últims cabals aforats són superiors als estimats (Taula 2.4).

<b>Balanç hídric</b>		Gran Valira (riu+EDAR)	Valira Nord
Cabals aforats	Cabals hm <sup>3</sup> /any	379,06	193,95
	Cabal específic (Qe) L/m <sup>2</sup> *any	850,35	1331,32
Mètode Thornthwaite	Pluja efectiva estimada L/m <sup>2</sup> *any	538,92	578,78
	Variació respecte Cabal Qe (%)	37	57

Taula 2.4. Diferència entre els cabals aforats (2015) i la pluja estimada en la conca. Font: Govern d'Andorra, 2018

Existeixen una sèrie de limitacions en aquest anàlisi ja que els cabals aforats poden dur associat fins un  $\pm 25$  % d'error, existeixen també limitacions en les anàlisis (incertesa del bon funcionament de les estacions d'aforament, en el càlcul del balanç hídric no es considera el fet que part de l'any la precipitació és en forma sòlida (neu) i s'incorpora mesos més tard al balanç, l'efecte del vent que varia els gruixos de neu o altres limitacions associades al càlcul de la ETP entre d'altres) (Govern d'Andorra, 2018).

Si s'analitzen els valors mitjans per al Principat d'Andorra, la precipitació mitjana per al període 1971-2000 s'eleva a 958 mm, i la temperatura mitjana del país es quantifica en 5,8 °C. Es quantifica la pluja efectiva o els excedents en 560 mm per any de mitjana, és a dir, un 59,5 % de la precipitació mitjana anual. Així mateix, s'ha valorat l'evapotranspiració mitjana en 398 mm, que representa el 41,5 % de les precipitacions totals. D'acord amb les dades anteriors, i considerant la superfície del país, el recurs hídric mitjà anual disponible pel Principat d'Andorra s'estima en uns 262 hm<sup>3</sup>/any (Govern d'Andorra, 2018).

## 2.2. Caracterització històrica dels cabals observats

Pel que fa als cabals principals dels rius es disposa de dades de cabals a Andorra en dues estacions d'aforament: del riu Valira del Nord a l'alçada del pont d'Escaldes-Engordany i del Gran Valira a l'alçada de la Borda Sabater proper a la frontera espanyola. Aquestes dades han estat facilitades pel SAIH Ebro (Sistema Automàtic d'Informació Hidrològica de la Conca hidrogràfica de l'Ebre). Les dades de les que es disposa són relativament recents, pel riu Valira del Nord remunten al 2002 i pel riu Gran Valira a la Borda Sabater comencen el 2009 (Figura 2.3).

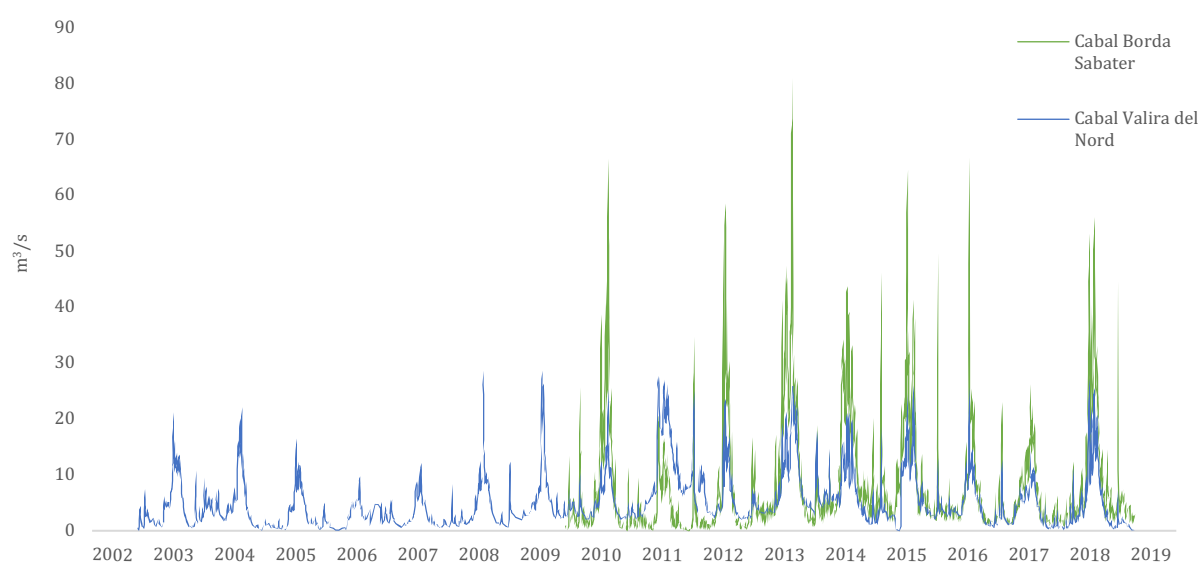


Figura 2.3. Cabal ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) del riu Valira del Nord i del riu Gran Valira a Borda Sabater. Font: Elaboració pròpia a partir de dades del SAIH Ebro

El fet de disposar només de dades molt recents de cabals dificulta una anàlisi de les últimes dècades i l'estudi de tendències. Si calculem la mitjana anual dels cabals és pot observar una forta variabilitat anual (Figura 2.4 i 2.5) en les dues estacions d'aforament sense cap tendència significativa en cap d'elles.

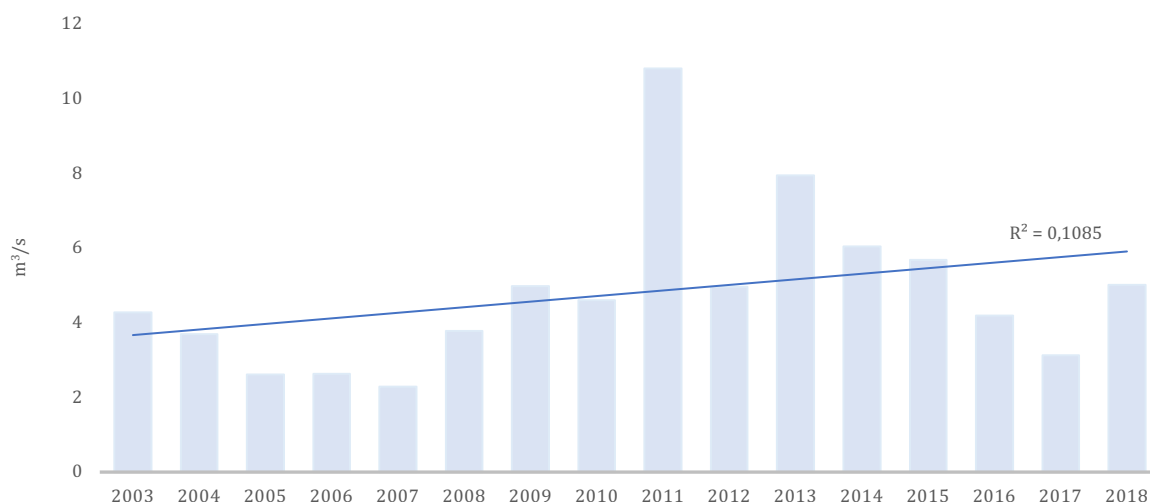


Figura 2.4. Mitjana del cabal (m³/s) del riu Valira del Nord. Font: Elaboració pròpia a partir de dades del SAIH Ebro

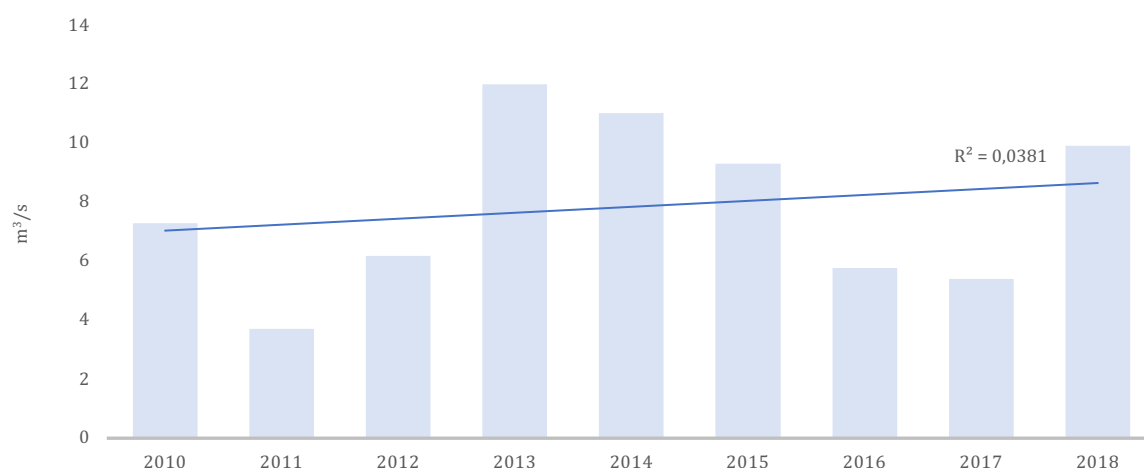


Figura 2.5. Mitjana del cabal (m³/s) del riu Gran Valira a Borda Sabater. Font: Elaboració pròpia a partir de dades del SAIH Ebro

D'altra banda s'ha estudiat la relació entre el cabal mensual i la precipitació mensual acumulada per diferents períodes en les estacions d'aforament del Pont d'Escaldes i de Borda Sabater. S'han utilitzat les dades de precipitació mensual utilitzades per l'anàlisi per Escaldes de FEDA (estació meteorològica de FEDA Central) prèviament homogeneïtzades pel CENMA. El període analitzat ha estat del 2009-2017 ja que és el període on es disposa de dades de les dues estacions per realitzar el comparatiu mensual.

Per a obtenir els gràfics següents (Figura 2.6 i 2.7) s'ha calculat l'evolució de l'acumulació de la precipitació mensual i el cabal mensual per als períodes 2009-2010, 2010-2011, 2011-2012, 2012-2013, 2013-2014, 2014-2015, 2015-2016 i 2016-2017 per l'estació d'aforament del Pont d'Escaldes i els mateixos períodes però afegint el 2017-2018 per a l'estació d'aforament de Borda Sabater. La Figura 2.6 mostra l'evolució per l'estació d'aforament del Pont d'Escaldes i s'observa principalment pics de precipitació al voltant de 120-160 mm mensuals a la tardor durant els mesos d'octubre i novembre i a la primavera durant els mesos de maig i juny. D'altra banda, els pics de cabal se situen principalment al maig amb valors que ronden els 350-450 m<sup>3</sup>/s mensuals. Si s'observen els períodes, podem dir que el 2015-2016 i el 2016-2017 són períodes més secs que la resta.

La Figura 2.7 mostra l'evolució per l'estació d'aforament de Borda Sabater i s'observa que el màxim de precipitació mensual sol produir-se durant els mesos d'octubre i novembre i durant la primavera amb valors de 70-120 mm mensuals. Els cabals màxims es donen de manera general al maig amb valors de 600-1000 m<sup>3</sup>/s mensuals. Per tant, podem dir que segueix les mateixes tendències que a Escaldes. Els períodes més secs són el 2010-2011, 2011-2012 i el 2015-2016 i 2016-2017.

Amb aquesta anàlisi s'observa cabals primaverals elevats en les dues estacions d'aforament al mateix temps que tenim precipitacions més baixes, això ens indica el paper regulador de la neu en aquests rius. El fet de tenir aquesta aportació de cabal desfasat temporalment que no prové de la precipitació en el mateix moment, indica que molt probablement prové de la fosa de la neu durant la primavera. Per tant, podem concloure que aquests cabals presenten un comportament de zones de muntanya amb una forta estacionalitat, on es produeixen cabals elevats durant la primavera a causa de la fusió de la neu i les elevades precipitacions, mentre que a finals de primavera i estiu aquests cabals disminueixen, i s'alternen períodes més secs. Sovint, aquests períodes coincideixen també amb pics en la demanda que poden ser causats pel turisme o l'augment del consum d'aigua per a piscines i activitats de lleure.

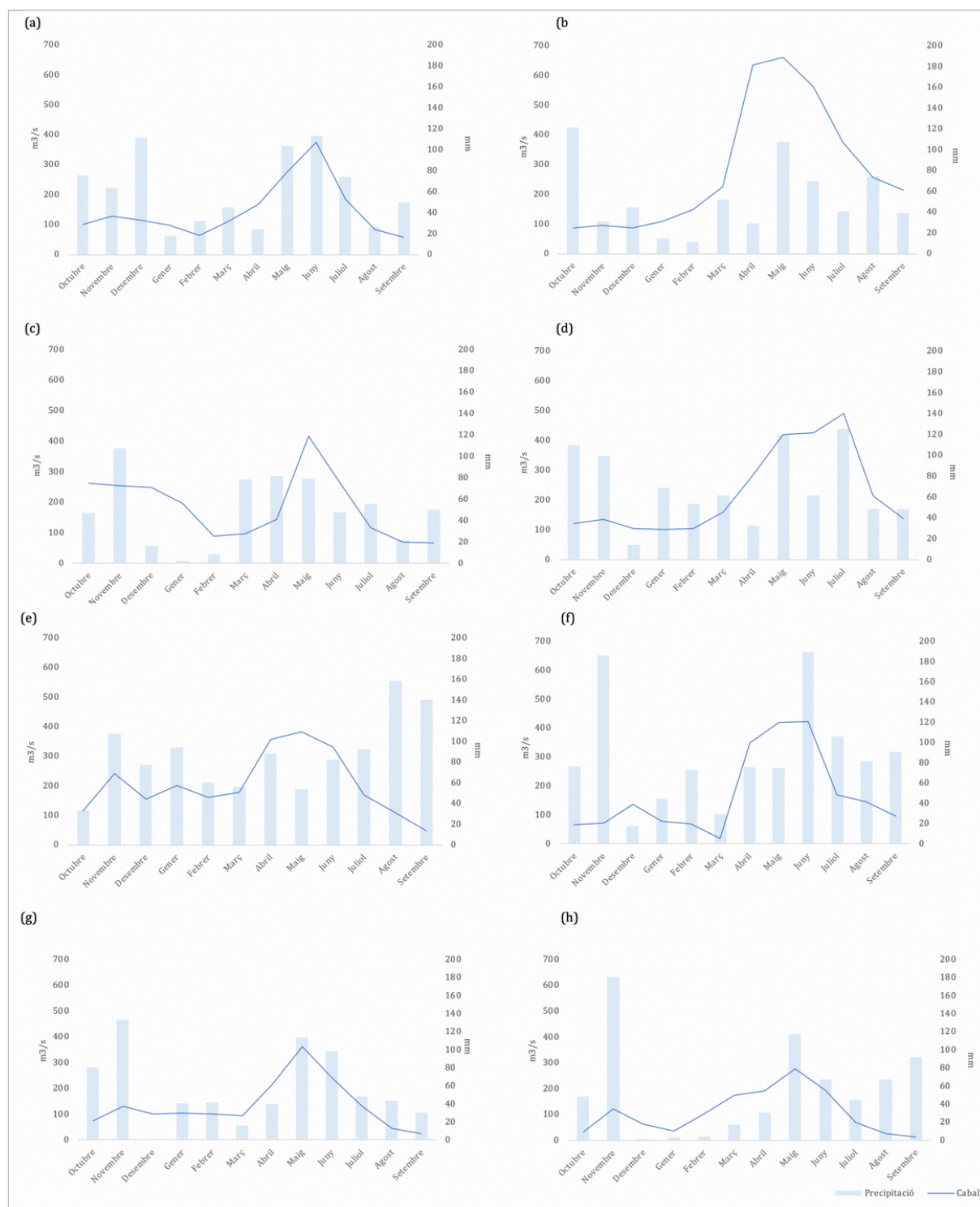


Figura 2.6. Comparatiu entre cabals ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) mensuals i precipitació per períodes ((a) període 2009-2010, (b) període 2010-2011, (c) període 2011-2012, (d) període 2012-2013, (e) període 2013-2014, (f) període 2014-2015, (g) període 2015-2016, (h) període 2016-2017) per l'estació d'aforament del Pont d'Escaldes. Font: Elaboració pròpia a partir de dades del SAIH Ebro i el CENMA



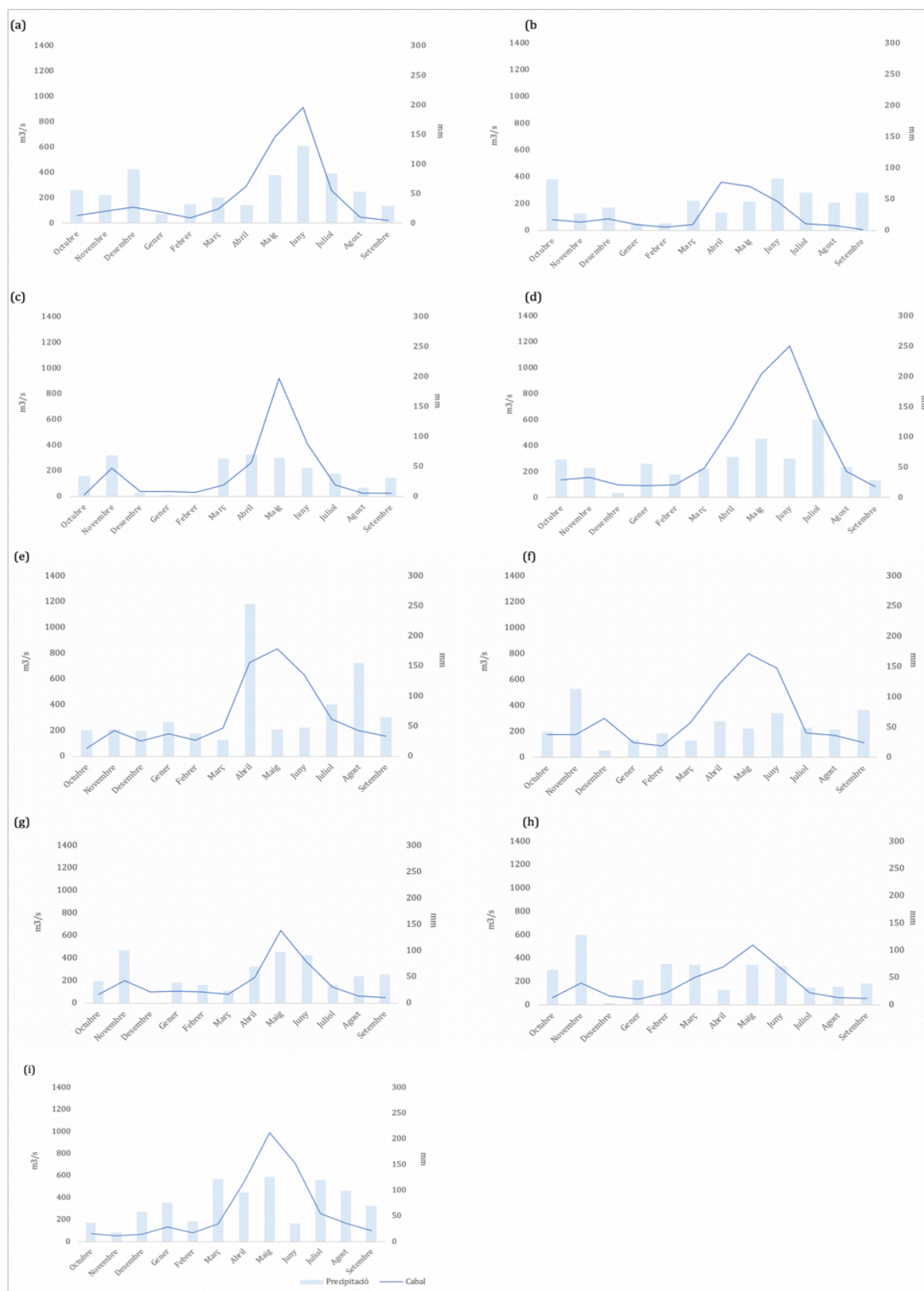


Figura 2.7. Comparatiu entre cabals ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) mensuals i precipitació per períodes ((a) període 2009-2010, (b) període 2010-2011, (c) període 2011-2012, (d) període 2012-2013, (e) període 2013-2014, (f) període 2014-2015, (g) període 2015-2016, (h) període 2016-2017, (i) període 2017-2018) per l'estació d'aforament de Borda Sabater. Font: Elaboració pròpia a partir de dades del SAIH Ebro i el CENMA

S'ha analitzat la correlació entre la precipitació i el cabal. Els resultats per l'estació d'aforament del pont d'Escaldes no mostren cap correlació ni patró significatiu entre les dues variables (Taula 2.5). En el cas de l'estació d'aforament de Borda Sabater, tot i que tampoc s'observa una correlació significativa, els valors mostren un lleuger patró d'un cabal amb dinàmica de muntanya amb valors del coeficient de Spearman més elevats els mesos d'alta pluviositat (novembre, juliol i agost) i amb valors molt menors el mesos on la dinàmica fluvial està especialment marcada per la fosa de neu (març i abril) (Taula 2.6).

	<b>p-value</b>	<b>Correlació de Spearman</b>
Període 2009-2017	5,7E-09	0,10
Octubre	0,13	-0,09
Novembre	0,58	0,03
Desembre	0,30	-0,06
Gener	0,36	0,06
Febrer	0,83	0,01
Març	0,03	0,13
Abril	0,26	-0,07
Maig	0,77	0,02
Juny	0,17	0,08
Juliol	0,0004	0,21
Agost	0,20	0,08
Setembre	0,27	-0,07

Taula 2.5. Càlcul de correlació entre les variables precipitació i cabal per tot el període 2009-2017 i mensualment (període 2009-2017) per a l'estació d'aforament del Valira Nord al Pont d'Escaldes. Font: Elaboració pròpia



	p-value	Correlació de Spearman
Període 2009-2018	2,2E-16	0,22
Octubre	0,0005	0,20
Novembre	3,7E-06	0,26
Desembre	0,001	0,18
Gener	0,02	0,14
Febrer	0,004	0,18
Març	0,16	0,08
Abril	0,19	0,08
Maig	0,0004	0,21
Juny	0,0001	0,23
Juliol	2,6E-06	0,28
Agost	4,2E-09	0,34
Setembre	0,004	0,18

Taula 2.6. Càlcul de correlació entre les variables precipitació i cabal per tot el període 2009-2018 i anàlisi mensual (període 2009-2017) per a l'estació d'aforament de Borda Sabater. Font: Elaboració pròpia

### 2.3. Anàlisi de tendències de cabals al Pirineu

En el Marc del projecte PIRAGUA en el qual es desenvolupa part d'aquesta tesi, s'han efectuat una sèrie d'anàlisis de diferents registres de cabal d'estacions d'aforament durant les últimes dècades (període 1950-2019) pel Pirineu (PIRAGUA (EFA210/16/PIRAGUA), 2020). Pel que fa al cas d'Andorra, es disposa de dades de cabal de dues estacions d'aforament, Borda Sabater i el Pont d'Escaldes. La temporalitat d'aquestes series però no permet efectuar anàlisis de tendències rellevants degut a que les sèries són massa curtes (aproximadament 10 anys) per una correcta anàlisi climàtica, el qual sovint requereix sèries superiors als 30 anys. Vist que aquestes sèries no entren dins dels criteris de selecció que s'han aplicat per l'anàlisi de tot el massís pirinenc, s'analitzaran els resultats d'estacions d'aforament pròximes a Andorra. Les estacions d'aforament analitzades d'Espanya i França són la Seu d'Urgell (Valira i Segre), Alins (Tor), Tirvia (Noguera de Cardós) i Puigcerdà (Segre) pel cas d'Espanya, Soueix-Rogalle (Le Salat), Saint Martin Lys (Le Rebenty), Lavelanet (La Touyre) i Chalabre (Le Blau) per França.

L'interès general del projecte Piragua és analitzar el conjunt de les estacions d'aforament dels Pirineus. Les sèries diàries de cabal que s'analitzen són per al període 1950-2019 i estan seleccionades segons una sèrie de criteris. Posteriorment es

determinen una sèrie d'indicadors per conèixer l'evolució dels cabals d'origen pirinenc. A partir d'aquí, es realitza una anàlisi espacio-temporal de les tendències dels cabals diaris dels rius del Pirineu a partir d'estadístics calculats (cabal mitjà, q25, q50, q75, entre altres). L'anàlisi de tendències s'aplica a les sèries d'estadístics calculades.

En la Figura 2.8 s'observen les tendències a escala anual d'alguns estadístics més significatius pels diferents períodes seleccionats del 1950 al 2019. Cada estació d'aforament ve representada per un triangle, el vèrtex del qual marca la direcció de la tendència observada (el vèrtex cap amunt indica una tendència ascendent mentre que el vèrtex cap avall una tendència descendent). El color del triangle indica la direcció i la significança de la tendència (blau per a les tendències ascendents i vermell per a les descendents i la intensitat del color és més fort per les significatives i més suau per a aquelles que no ho són). A més, la mida del triangle indica la magnitud de la tendència, de manera que el triangle és major en aquelles tendències de major magnitud. A la part inferior esquerra de cada mapa s'observen una sèrie de números que ens indiquen segons l'ordre el nombre d'estacions que tenen: tendències negatives significatives, tendències negatives, tendències positives, tendències positives significatives.

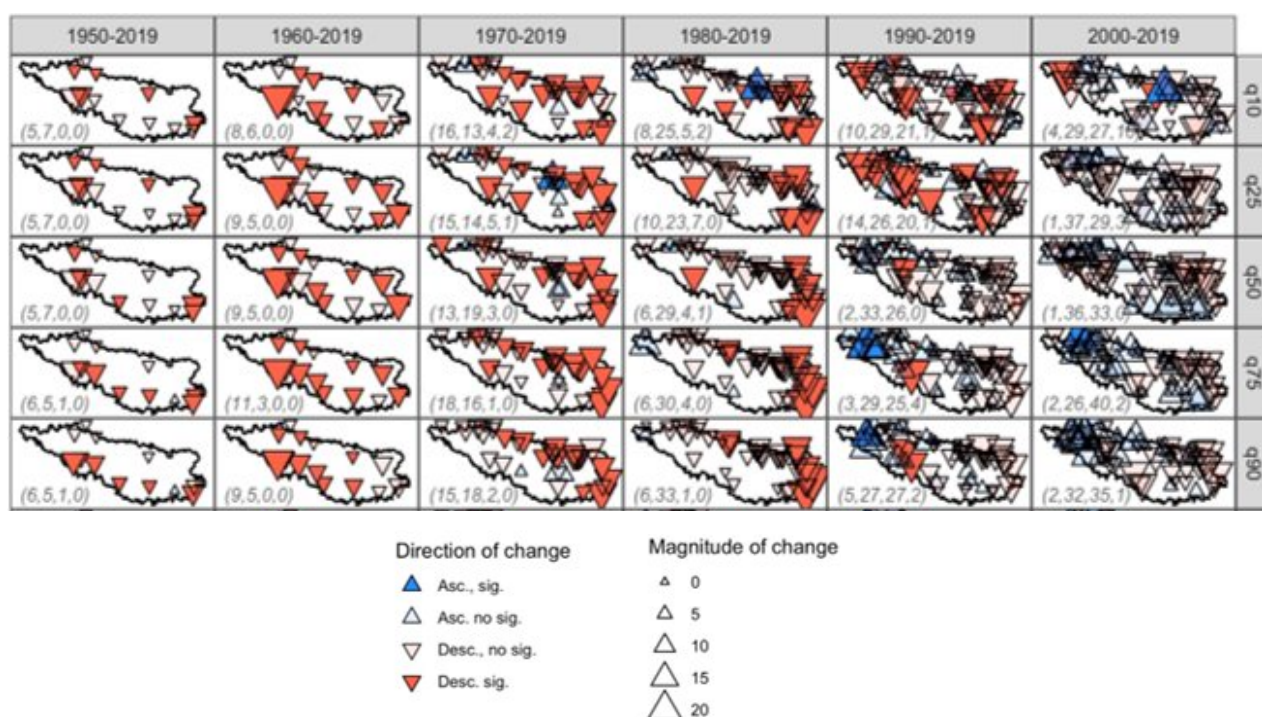


Figura 2.8. Exemple de representació dels resultats obtinguts a escala de Pirineus per als quartils q10, q25, q50, q75 i q90) per als períodes analitzats. Font: PIRAGUA (EFA210/16/PIRAGUA), 2020.

Els resultats de l'anàlisi de tendències dels diferents indicadors mostren tendències negatives dels quartils amb un elevat percentatge de tendències significatives quan s'analitzen els períodes de temps més llargs. A mesura que s'avança en el temps, s'observen més estacions d'aforament presents en l'anàlisi, les tendències a escala anual són poc clares i el percentatge de tendències significatives disminueix de manera important. Les tendències significatives mostren direccions oposades per a un mateix estadístic sense una distribució espacial clara. Això és degut a que els períodes són més curts (1990-2019, 2000-2019) tot i que s'observen tendències més positives fet que ens podria fer pensar que ha tingut lloc una altre tipus de gestió del recurs hídric. Els resultats de les anàlisis de les tendències més significatives dels cabals a nivell del Pirineu mostren que el cabal mitjà ha disminuït un 15 % entre 1960 i 2019 (50 anys). A partir del període 1970-2019 comença a observar-se un canvi de tendència en alguns dels estadístics. El període 1980-2019 segueix presentant tendències negatives amb una disminució d'un 20 % dels cabals mitjans anuals per a la totalitat el període (40 anys).

La homogeneïtat espacial observada en les sèries més llargues de 70 i 60 anys i la heterogeneïtat de les sèries més curtes pot ser un efecte d'un clima més heterogeni espacialment en el passat més recent o per l'efecte de canvis en els usos del sòl que no són homogenis regionalment, tot i que podria ser una combinació d'ambdós factors.

En el marc d'aquesta tesi s'analitzaran una sèrie d'estacions seleccionades properes a Andorra i basades en les tendències anuals i mensuals per al període complet 1960-2019 o 1970-2019 segons la disponibilitat de dades de cada estació, de la mitjana del cabal i s'analitzaran els estadístics següents: la significació (p-valor) de Kendall (sig), el percentatge de canvi anual observat (trend\_r), el percentatge de canvi per decenni (trendd\_r) i el percentatge de canvi per la totalitat del període (trendp\_r).

Per a cada estació d'aforament s'obté una anàlisi que inclou l'hidrograma amb els períodes mancants i que permet observar les dades de partida, una anàlisi per decenni de la distribució de cabals tant a escala anual com a escala mensual (la Figura 2.9 mostra un exemple de la representació d'aquests resultats, la resta pot consultar-se a la Figura 1 de l'Annex 1). Aquestes dades faciliten l'anàlisi de possibles canvis en la distribució dels cabals al llarg del temps durant l'època analitzada. Finalment també s'ha obtingut

l'anàlisi de tendències per a l'època analitzada. En el cas de moltes de les estacions seleccionades, l'anàlisi de les tendències anuals no s'ha pogut realitzar ja que no compleix amb els criteris específics. Les sèries tenen mancances de dades per tot l'any, per tant, en aquest casos només s'ha realitzat l'anàlisi estacional d'aquells períodes on es compleixen els requisits. En aquesta última anàlisi es marquen i s'indica la magnitud d'aquelles tendències que resulten ser significatives.

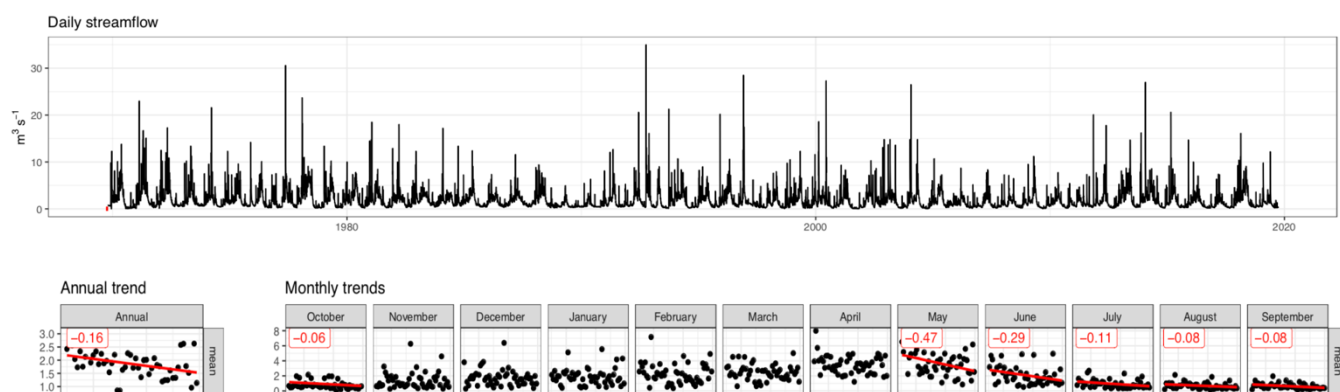


Figura 2.9. Exemple de representació dels resultats obtinguts per a la estació d'aforament de Lavelanet (França) pel període 1970-2019. Font: PIRAGUA (EFA210/16/PIRAGUA), 2020 .

Si s'analitzen els resultats de les tendències per a l'estadístic “mitjana” del cabal calculat s'observen poques tendències significatives anualment degut a la falta de dades de les estacions d'aforament properes a Andorra. Les que mostren una tendència significativa són les tres estacions que es troben a França, Soueix-Rogalle, Saint Martin Lys i Lavelanet. Aquestes estacions mostren un descens de la mitjana del cabal anual de -0,3 %, -0,7 % i -0,7 % respectivament. S'observa un descens del cabal mitjà per decenni de -3,3 %, -7,4 % i -7,3 % i un descens per a la totalitat del període analitzat de -19,5 %, -42,3 % i -36,4 % respectivament (Figura 2.10). La resta d'estacions o no disposen de dades o mostren unes tendències no significatives en ambdós sentits, tant de disminució de cabals com d'increment.

Si s'analitzen els resultats mensualment (Figura 2.11) s'observen algunes tendències significatives. En general s'observen descensos de cabals anuals que rondan el -1 %, vora el -10 % de descens dels cabals per decenni i reduccions de -50 % del cabal per a la totalitat del període (60 anys). La majoria de tendències significatives de disminució dels cabals es centren en els mesos d'octubre per les estacions de la Seu d'Urgell (Segre),

Puigcerdà (Segre), Saint Martin de Lys i Lavelanet, i de maig a setembre per a les estacions de Seu d'Urgell, Puigcerdà (Segre), Soueix-Rogalle, Saint Martin de Lys, Lavelanet i Chalabre. Entre els mesos de desembre a abril, cal destacar que les estacions d'Alins i de Borda Sabater presenten tendències positives, essent Alins (Tor) la que presenta augments de cabal d'1% pels cabals anuals, del 10 % dels cabals per decenni i d'entre 50 % i 130 % dels cabals per a la totalitat del període de desembre a abril en la majoria dels casos significatius estadísticament. (A l'Annex 1, Taula 1 es detallen els resultats dels estadístics calculats per a les estacions d'aforament seleccionades).

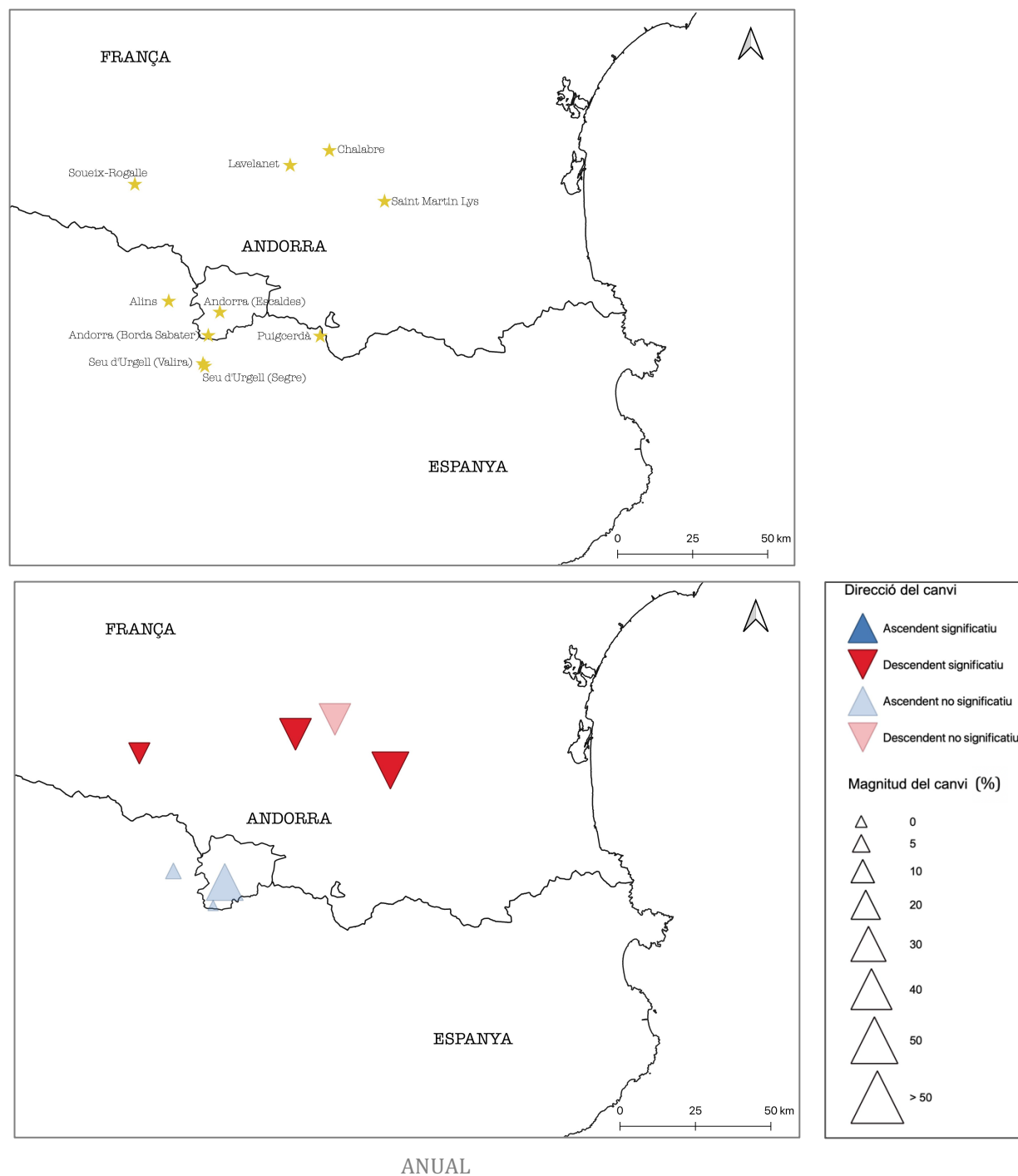


Figura 2.10. Situació de les estacions d'aforament i representació dels resultats de les tendències anuals per a les diferents estacions d'aforament pel període 2010-2018. Font: Elaboració pròpia a partir de dades del projecte PIRAGUA (EFA210/16/PIRAGUA), 2020

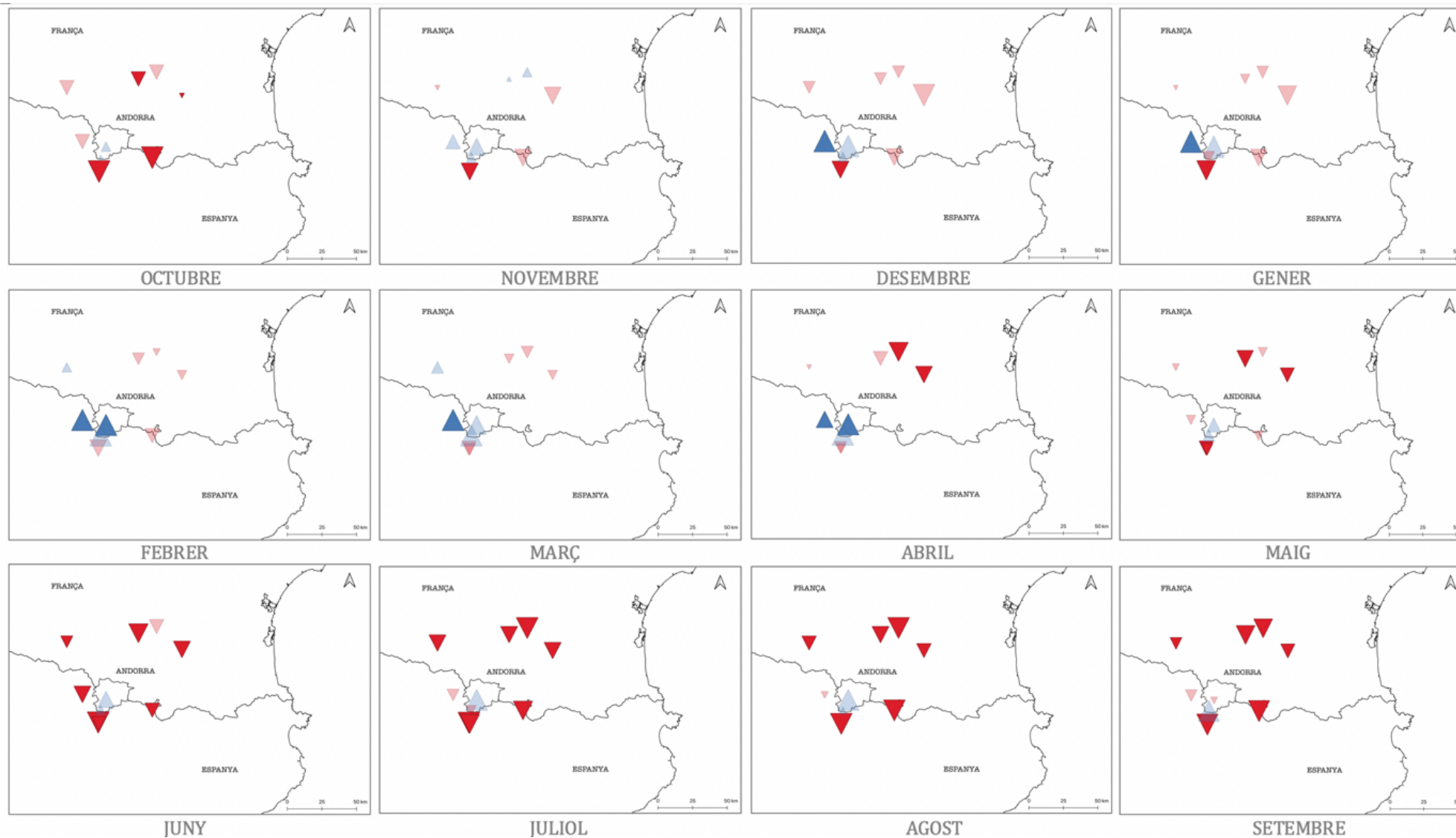


Figura 2.11. Representació dels resultats de les tendències mensuals per a les diferents estacions d'aforament pel període 2010-2018. Font: Elaboració pròpia a partir de dades del projecte PIRAGUA (EFA210/16/PIRAGUA), 2020

### 2.3.1. Anàlisi de tendències de cabal a Andorra

Pel cas d'Andorra, també s'ha realitzat l'anàlisi de les dades de cabals diàries de les dues estacions d'aforament. Tot i que les sèries disponibles són curtes (10 anys) per realitzar una anàlisi climàtica de tendències rellevant, s'ha realitzat igualment per tal de poder comparar la seva evolució amb les estacions d'aforament veïnes.

L'anàlisi s'ha realitzat per a les estacions d'aforament d'Escaldes pel Valira del Nord i Borda Sabater pel riu Gran Valira.

S'han calculat les tendències del cabal a escala anual i mensual per les dues series diàries de cabals del 2003 al 2018 per l'estació d'aforament del Pont d'Escaldes i del 2010 al 2018 per l'estació d'aforament de Borda Sabater. Els estadístics que analitzarem són el cabal mitjà i els quartils 25 i 75 (q25 i q75) que indiquen els cabals baixos i alts.

S'observa una mitjana del cabal per l'estació d'aforament d'Escaldes que varia entre 2,5 i 9,5 m<sup>3</sup>/s, amb cabals baixos que ronden els 1-4 m<sup>3</sup>/s i cabals alts de 3,5 a 10 m<sup>3</sup>/s (Taula 2.7).

Any	Mitjana (m <sup>3</sup> /s)	sd	q25 (m <sup>3</sup> /s)	q75(m <sup>3</sup> /s)
2003	3,9	4,1	1,0	5,0
2004	4,4	4,0	2,1	5,1
2005	2,5	3,1	0,5	3,4
2006	2,4	2,0	0,5	4,2
2007	2,5	2,3	1,0	3,1
2008	3,5	3,9	1,2	4,3
2009	4,7	4,6	2,2	5,1
2010	4,8	3,4	2,4	5,7
2011	9,5	7,1	3,5	14,7
2012	6,1	4,3	3,0	8,0
2013	7,5	5,5	3,7	10,0
2014	6,7	4,1	4,1	8,3
2015	5,6	5,2	2,3	8,7
2016	4,4	3,3	2,5	5,5
2017	3,6	3,0	1,1	5,5
2018	4,9	5,9	0,8	6,5

Taula 2.7. Càlcul anual dels estadístics (període 2003-2018) per a l'estació d'aforament del Pont d'Escaldes. Font: Elaboració pròpia a partir de dades del projecte PIRAGUA (EFA210/16/PIRAGUA), 2020



S'han calculat també els estadístics per a la estació d'aforament del riu Gran Valira a Borda Sabater pel període 2010-2018. S'observa una mitjana del cabal que varia entre 3,6 i 12 m<sup>3</sup>/s, amb cabals baixos que ronden els 1-4 m<sup>3</sup>/s i cabals alts de 5 a 20 m<sup>3</sup>/s (Taula 2.8).

Any	Mitjana (m <sup>3</sup> /s)	sd	q25(m <sup>3</sup> /s)	q75(m <sup>3</sup> /s)
2010	7,5	10,5	1,1	8,7
2011	3,6	4,4	0,6	5,0
2012	5,8	10,1	0,6	5,6
2013	12,0	13,6	3,2	19,6
2014	10,3	9,3	4,1	13,9
2015	10,1	9,5	4,0	12,9
2016	5,9	7,0	2,2	6,5
2017	5,8	5,3	1,8	8,1
2018	9,2	11,1	2,5	10,3

Taula 2.8. Càlcul anual dels estadístics (període 2010-2018) per a l'estació d'aforament de Borda Sabater.  
Font: Elaboració pròpia a partir de dades del projecte PIRAGUA (EFA210/16/PIRAGUA), 2020

Posteriorment l'anàlisi de tendències s'aplica en les sèries dels estadístics calculats per a les dues estacions d'aforament, els resultats es mostren a la Taula 2.9 i 2.10.

Escaldes	trend_r (%)	trendp_r (%)	trendd_r (%)	sig
Anual	4,5	71,5	44,7	0,2
Octubre	1,5	24,3	15,2	0,8
Novembre	4,3	68,9	43,1	0,5
Desembre	8,3	132,6	82,9	0,5
Gener	17,3	277,5	173,5	0,2
Febrer	29,0	463,2	289,5	0,04
Març	5,3	84,3	52,7	0,2
Abril	6,2	99,6	62,2	0,002
Maig	3,2	51,9	32,4	0,2
Juny	4,3	69,3	43,3	0,3
Juliol	8,6	137,0	85,6	0,2
Agost	9,8	156,4	97,7	0,7
Setembre	-0,4	-6,8	-4,3	0,9

Taula 2.9. Anàlisi de tendències per a l'estadístic "mitjana" per a l'estació d'aforament d'Escaldes. De color vermell es mostren les tendències significatives. Font: Elaboració pròpia a partir de dades del projecte PIRAGUA (EFA210/16/PIRAGUA), 2020

Borda Sabater	trend_r (%)	trendp_r (%)	trendd_r (%)	sig
Anual	0,1	0,6	0,7	0,5
Octubre	0,9	8,2	9,2	0,9
Novembre	1,1	9,8	10,9	0,9
Desembre	-2,8	-25,4	-28,2	0,7
Gener	8,6	77,3	85,8	0,3
Febrer	23,2	208,7	231,9	0,5
Març	15,8	142,6	158,5	0,3
Abril	2,7	24,4	27,1	1,0
Maig	1,4	12,5	13,9	1,0
Juny	-2,0	-17,9	-19,8	1,0
Juliol	0,8	7,4	8,2	0,7
Agost	8,1	72,6	80,7	0,7
Setembre	90,1	810,6	900,7	0,4

Taula 2.10. Anàlisi de tendències per a l'estadístic "mitjana" per a l'estació d'aforament de Borda Sabater. De color vermell es mostren les tendències significatives. Font: Elaboració pròpia a partir de dades del projecte PIRAGUA (EFA210/16/PIRAGUA), 2020

Els resultats no mostren cap tendència significativa anualment. Si observem els resultats mensuals només s'obtenen dues tendències significatives ( $p\text{-value} < 0,05$ ) per a l'estació d'aforament d'Escaldes els mesos de febrer i abril. Per al mes de febrer s'observen valors positius d'augment anual del cabal de 29 %, un augment del cabal per decenni del 450 % i un augment del cabal per la totalitat del període del 290 %. Per al mes d'abril s'observa un augment anual del cabal de 6 %, un augment del cabal per decenni del 99 % i un augment del cabal per a la totalitat del període del 62%.

Tot i que la longitud de les sèries no ens permet extreure conclusions clares degut a la poca significança de les sèries, s'observa un comportament similar a l'estació d'Alins, amb una variació molt petita durant la majoria de mesos excepte el mesos de finals d'hivern, principis de primavera (en aquest cas febrer i març) on s'identifica un increment marcat del cabal. Aquesta dinàmica serà interessant seguir-la per veure si es manté amb sèries més llargues i especialment analitzar-ne la seva relació amb la coberta de neu ja que una hipòtesi és que es podria derivar de períodes de fosa de neu marcats més avançats en el temps que els habituals d'abril a juny. La majoria d'estacions del voltant tenen patrons de disminució dels cabals anuals durant la majoria dels mesos.

Per altra banda, comentar que el fet de tenir sèries de cabals curtes no ens permet calcular tendències significatives però que probablement si aquestes sèries fossin més llargues podríem trobar comportaments similars del cabal amb les estacions properes a Andorra, per tant, no vol dir que els cabals d'Andorra no tinguin tendències i es comportin diferentment que la resta dels Pirineus si no que és normal que amb les sèries curtes no trobem grans tendències. Per aquest motiu, serà interessant poder fer aquesta anàlisi de nou quan es disposi de suficients dades històriques i així veure el comportament dels nostres rius.

Per concloure el capítol, resumir que el Govern d'Andorra realitza de forma anual el càlcul del balanç hídric quantificant el recurs hídric mitjà anual disponible pel Principat d'Andorra a 262 hm<sup>3</sup>/any. S'observa una variabilitat anual marcada pels factors climàtics que alternen mínims de cabal l'any 2012 i 2015 (200 i 250 hm<sup>3</sup>/anuals respectivament) i màxims el 2014 i 2018 (330 i 340 hm<sup>3</sup>/anuals respectivament).

Aquestes dades difereixen dels cabals aforats d'entre 37 a 57 % mostrant limitacions en el model i possiblement problemes en les estacions d'aforament.

A partir de les dades dels cabals aforats d'Andorra s'analitza la mitjana anual dels cabals i s'observa una gran variabilitat anual sense cap tendència estadísticament significativa pel riu Valira del Nord i pels cabals del Gran Valira. Aquesta variabilitat també es veu quan s'analitzen els cabals per temporada. Analitzant amb més detall la relació entre el cabal mensual i la precipitació mensual acumulada per diferents períodes per les dues estacions d'aforament, l'estació del Pont d'Escaldes observa pics de precipitació a la tardor i primavera (120-160 mm mensuals) i pics de cabal al maig (350-450 m<sup>3</sup>/s mensuals). Per a l'estació d'aforament de Borda Sabater s'observa el mateix, màxims de precipitació mensual a la tardor i primavera (70-120 mm mensuals) i cabals màxims al maig (600-1000 m<sup>3</sup>/s mensuals). Això indica un comportament dels cabals de zones de muntanya amb una forta estacionalitat, amb cabals elevats durant la primavera a causa de la fusió de la neu i elevades precipitacions, mentre que a finals de primavera i estiu aquests cabals disminueixen.

D'altra banda, l'anàlisi de tendències de la mitjana de cabal per a diferents estacions del Pirineu properes a Andorra dona poques tendències significatives anualment degut a la falta de dades de les estacions d'aforament. Les estacions que mostren una tendència significativa són Soueix-Rogalle, Saint Martin Lys i Lavelanet amb un descens del cabal per a la totalitat del període analitzat de -19,5 %, -42,3 % i -36,4 %. L'anàlisi mensual dels resultats dona més tendències significatives quan s'analitza un període amb sèries diàries de cabal llargues. En general s'observen reduccions del 50 % del cabal per a la totalitat del període (60 anys) i aquesta disminució del cabal s'observa de maig a setembre. En el mesos de desembre a abril, aquestes tendències són menys marcades i en alguns casos amb tendència positiva estadísticament.

Pel cas d'Andorra cal destacar que no es disposen de sèries llargues per a realitzar una anàlisi estadística rellevant, no obstant, s'obtenen tendències que tot i no ser significatives mostren un augment dels cabals en els deu últims anys, similars a alguns casos estadísticament significatius com és el cas d'Alins, de condicions geogràfiques similars.

## 2.4. Punts clau del capítol

- El recurs hídric mitjà anual disponible a Andorra entre els anys 1971 i 2000 ha estat de 262 hm<sup>3</sup>/any segons l'estudi de Balanç Hídric del Govern d'Andorra. Aquest valor s'estima a partir de la precipitació mitjana (1971-2000) de 958 mm i de la temperatura mitjana de 5,8 °C. La pluja efectiva o excedents és de 560 mm anuals de mitjana que representen un 59,5 % de la precipitació mitjana i una evapotranspiració mitjana que s'avalua a 398 mm anuals (41,5 % de la precipitació mitjana)(Govern d'Andorra, 2018).
- Els cabals a Andorra mostren una forta estacionalitat amb pics durant la primavera a causa de la fusió de la neu i elevades precipitacions indicant un comportament típic de zones de muntanya. Els pics de precipitació per a l'estació d'aforament d'Escaldes s'obtenen durant la tardor (octubre-novembre) i la primavera (maig i juny) amb valors de 120-160 mm mensuals. Els pics de cabal es donen durant la tardor també i primavera (maig) amb valors de 350-450 m<sup>3</sup>/s mensuals. Per a l'estació d'aforament de Borda Sabater s'obté la mateixa dinàmica amb pics de precipitació a la tardor i primavera i valors entre 70-120 mm mensuals i cabals màxims a la primavera amb valors entre 600-1000 m<sup>3</sup>/s mensuals.
- Existeixen poques tendències estadísticament significatives quan s'analitza la mitjana dels cabals anuals per a diferents estacions properes a Andorra, en canvi, quan l'anàlisi es realitza mensualment aquestes tendències resulten més significatives en alguns casos. Per exemple, s'observen reduccions del 50 % del cabal per a la totalitat del període 1960-2019 (60 anys).
- La majoria de tendències significatives de disminució dels cabals se centren en els mesos d'octubre per a les estacions de la Seu d'Urgell (Segre), Puigcerdà (Segre), Saint Martin de Lys i Lavelanet, i de maig a setembre per a les estacions de la Seu d'Urgell, Puigcerdà (Segre), Soueix-Rogalle, Saint Martin de Lys, Lavelanet i Chalabre. Entre els mesos de desembre a abril, destacar que les estacions d'Alins i Borda Sabater (Andorra) presenten tendències positives (augments de cabal entre 50-130 % per a la totalitat del període).
- Pel cas d'Andorra a excepció de l'estació d'aforament del Pont d'Escaldes (augments de cabal del 29 % anuals al febrer i 0,9 % a l'abril) no existeix cap tendència estadísticament significativa quan s'analitza la mitjana dels cabals

degut probablement a que les sèries que es disposen són molt curtes. De totes maneres, les dues estacions d'aforament d'Andorra donen valors positius de tendències de cabal que corroboren que els últims anys no han sigut molt secs. Aquestes tendències també les trobem en algunes estacions d'aforament properes a Andorra on observem tendències positives de desembre a abril.

## 2.5. Referències

- Govern d'Andorra. (2018). *Estudi per a l'elaboració anyal del balanç hídric del Principat d'Andorra*. <https://www.mediambient.ad/el-recurs>
- Govern d'Andorra. (2019). Ministeri de Medi Ambient i Sostenibilitat. Aigua - El recurs. <https://www.mediambient.ad/el-recurs>
- Govern d'Andorra. (2020). Ministeri de Medi Ambient i Sostenibilitat. Aigua - La despesa hídrica. <https://www.mediambient.ad/la-despesa-hidrica>
- PIRAGUA (EFA210/16/PIRAGUA). (2020). *Document intern del projecte PIRAGUA*.

## **3. PROJECCIÓ FUTURA DEL RECURS HÍDRIC A ANDORRA**

---

### **3.1. Model RHESSys**

### **3.2. Modelització dels recurs hídric a Andorra amb el model RHESSys**

#### **3.2.1. Àrea d'estudi**

#### **3.2.2. Dades climàtiques i hidrològiques**

#### **3.2.3. Escenaris de canvi climàtic i usos del sòl**

#### **3.2.4. Calibració i Resultats**

### **3.3. Punts clau del capítol**

### **3.4. Referències**

### 3. PROJECCIÓ FUTURA DEL RECURS HÍDRIC A ANDORRA

---

#### 3.1. Model RHESSys

Per tal de simular l'evolució futura del recurs hídric a Andorra s'ha utilitzat el model RHESSys. El Sistema regional de simulació hidroecològica, RHESSys (Regional Hydro-Ecological Simulation System) és un model hidroecològic de distribució espacial utilitzat per simular el cicle de l'aigua, el carboni i els nutrients i el transport per terrenys espacialment variables (Tague i Band, 2004). Els processos simulats inclouen fluxos d'humitat verticals (intercepció, transpiració, evapotranspiració i recàrrega d'aigües subterrànies) i fluxos laterals entre les unitats espacials (Band, Tague, Brun, Tenenbaum i Fernandes, 2000). El model s'estructura com una representació espacial jeràrquica del paisatge (Figura 3.1) amb un ventall de processos hidrològics, microclimàtics i ecosistèmics associats a objectes específics del paisatge a diferents nivells de la jerarquia. Aquest enfocament està dissenyat per facilitar l'anàlisi ambiental que requereix una comprensió dels processos dins de les conques hidrogràfiques, així com els fluxos d'aigua, carboni i nitrogen (Tague i Band, 2004).

Com a model hidrològic, RHESSys és intermedi en termes de complexitat. Representa processos hidrològics claus que són importants per a estimar els impactes del canvi climàtic i de l'ús del sòl en el cabal, incloent la transpiració de la vegetació i l'evaporació del sòl, la capa de neu, la infiltració i la redistribució de la humitat tant vertical com lateral.

La representació del perfil vertical del sòl, però, es basa en un model de dues capes bastant simple amb una zona insaturada i una zona saturada. A més de la hidrologia, RHESSys és capaç de modelitzar *feedbacks* entre la hidrologia i l'ecosistema del cicle del carboni i nitrogen incloent el creixement de la vegetació (Tague i Band, 2004).



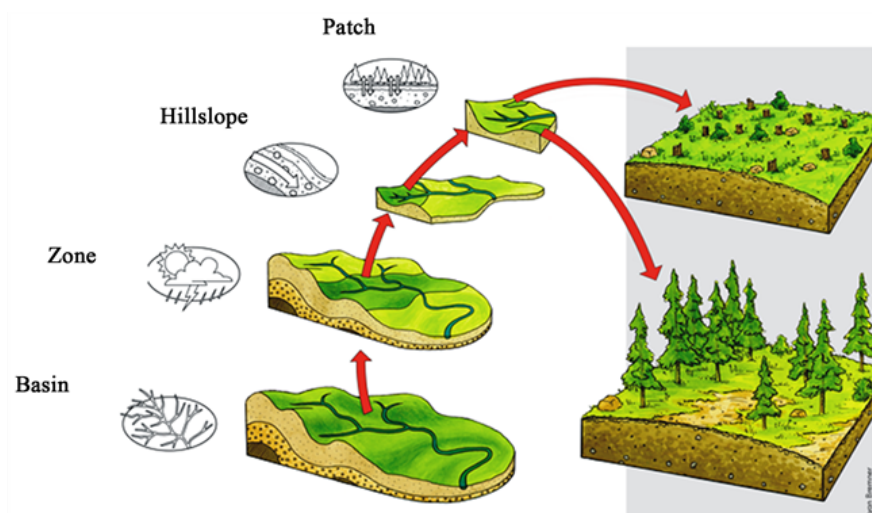


Figura 3.1. Jerarquia espacial del paisatge dins del model RHESSys. Font: Sanford, 2005

Una de les característiques úniques de RHESSys és la seva representació jeràrquica del paisatge que permet modelitzar diferents processos a diverses escales. Cada nivell espacial està associat a la modelització de diferents processos per RHESSys i a una escala particular. A l'escala més petita, els '*patches*' es defineixen per àrees de l'ordre de  $m^2$ , mentre que les conques ( $km^2$ ) defineixen l'escala més gran. Aquestes unitats de modelització són definides per l'usuari abans d'executar el model (Band, Patterson, Nemani i Running, 1993; Lammers, Band i Tague, 1997 i Tague i Band, 2004). Per més detalls sobre l'estructura del model podeu consultar l'estudi de Band et al. (2000).

El model RHESSys requereix un gran nombre d'entrades de dades, incloent tant dades espacials com mapes generats amb SIG (Sistema d'informació geogràfica), com dades en forma de taules (Figura 3.2). Els mapes, que generalment es generen amb SIG, representen la topografia, la vegetació, el sòl i l'ús del sòl. Les taules inclouen dades climàtiques (precipitació diària, temperatures màximes i mínimes) i valors predeterminats de les característiques fisiològiques de la vegetació i característiques físiques dels sòls (Mengistu, Ali, i Yassin, 2016; Tague i Band, 2004).

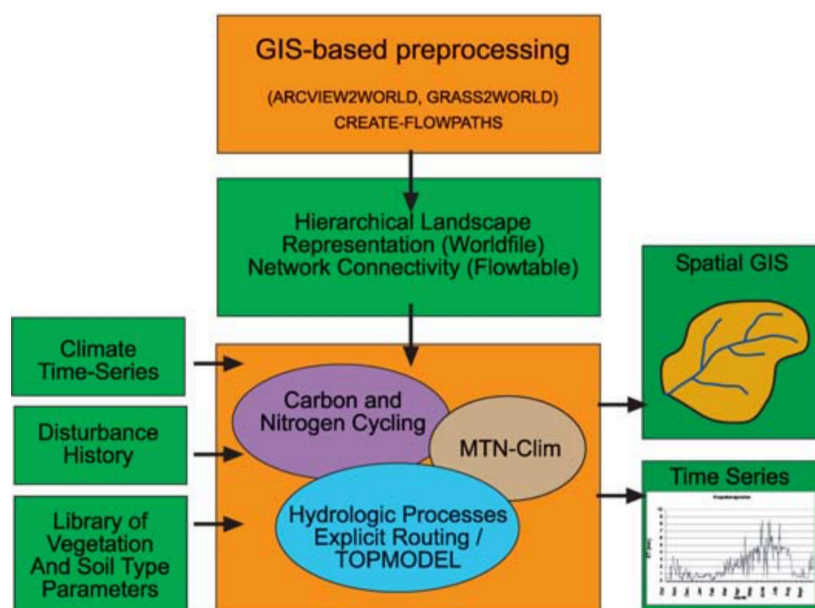


Figura 3.2. Estructura del model RHESSys : Entrades, sortides i pre-processament. Font: Tague i Band, 2004

### 3.2. Modelització dels recurs hídric a Andorra amb el model RHESSys

Les zones de muntanya produeixen gran part de l'escolament i són claus pel subministrament aigües avall. A Andorra ens trobem en la zona de capçalera, per tant, actualment no ens trobem amb un dèficit de recurs hídric però existeix la necessitat d'estudiar aquest recurs per mantenir una bona qualitat i quantitat d'aigua en el futur per tal de garantir el subministrament tant domèstic, com pel turisme i la producció d'energia. Tot i que a Andorra no es detecta un descens important del recurs hídric, a nivell de la resta del Pirineu varis estudis científics corroboren un descens generalitzat del cabal dels rius mediterranis en les darreres dècades i aquest descens s'explica per el canvi en les condicions climàtiques i la coberta del sòl a causa dels canvis en els usos del sòl (García-Ruiz, López-Moreno, Vicente-Serrano, Lasanta-Martínez i Beguería, 2011a). A Andorra s'ha detectat un augment de la temperatura mitjana anual de 0,18 °C/decenni que podria anar associada a un augment de l'evapotranspiració, canvis en l'acumulació i fosa de la neu i una disminució del cabal. També s'ha observat una lleugera tendència a la disminució de la precipitació anual de -2,6 %/decenni que també pot anar associada a una disminució del recurs. Als Pirineus també s'identifica un canvi en els usos del sòl associat a un augment de la superfície coberta per boscos i arbusts com a conseqüència de l'abandonament de les terres (García-Ruiz i Lana-Renault, 2011b).

En el cas d'Andorra la modificació dels usos del sòl no ha variat de manera significativa en els darrers anys respecte la globalitat del territori. Destacar l'estudi que fa el CENMA (Cartig (2019)) on estudien l'evolució del territori andorrà per al període 1948-2012 a partir de mapes de cobertes del sòl dels anys 1948, 1972, 1995 i 2012. En termes de superfície total es pot constatar que el canvi més substancial ha estat el creixement de la zona boscosa, la qual ha augmentat més d'un 10%. Aquest creixement s'ha fet en gran mesura en zones que antigament eren matollars, prats o boscos esclarissats. Una altra de les categories que ha canviat substancialment és la de conreus degut al progressiu abandonament de la superfície de conreus. En aquest cas es passa d'un 5% del territori andorrà fins a un 1,7% del darrer mapa (2012). No obstant això, cal puntualitzar que en les darreres dues o tres dècades aquesta superfície s'ha sabut mantenir.

Les categories de zones urbanes i vies de comunicació són les que han augmentat més, creixent des de l'any 1948 al 2012 un 230 %. Tot i així, en els últims anys aquestes zones urbanes no han crescut de manera tant significativa ja que s'ha frenat considerablement la velocitat d'expansió urbana, vora un 14 % per al període 1995-2012 tot i que no existeixin estudis publicats el criteri expert de tècnics dels comuns ens ho corrobora.

En aquest capítol s'aborda la modelització dels recurs hídric del Principat d'Andorra i la seva evolució futura mitjançant el model hidrològic RHESys i s'avaluarà la disponibilitat del recurs hídric a partir d'una sèrie d'escenaris climàtics i d'usos del sòl.

### **3.2.1. Àrea d'estudi**

L'àrea d'estudi correspon a la conca d'Andorra (468 km<sup>2</sup>) amb el riu Valira del Nord i el Valira d'Orient en les zones de capçalera que acaben drenant al riu Gran Valira. Aquests componen les tres conques principals, la Conca del Riu Valira del Nord, la Conca del Riu Valira d'Orient i la Conca del Riu Valira (Figura 1.2).

La temperatura mitjana a Andorra durant el període 1950-2015 ha estat de 7,9 °C, la temperatura màxima i mínima mitjana han estat de 12,7 °C i 3,1°C respectivament, i la precipitació mitjana de 66,8 mm (càlcul a partir de les dades facilitades per FEDA de les estacions meteorològiques Central, Engolasters i Ransol).

Les estacions més plujoses són generalment la primavera i la tardor, a l'hivern són importants també però sovint en forma de neu. L'estiu és generalment sec. A altituds superiors als 1500 m.s.n.m durant l'hivern tenim generalment una capa de neu continua de desembre a abril. El cabal es registra en l'estació d'aforament situada al riu Valira a la Seu d'Urgell. Aquest règim fluvial reflecteix les característiques climàtiques, baixos cabals durant l'hivern degut a la retenció d'aigua en forma de neu i cabals màxims durant la primavera degut al període de fusió de la neu.

### 3.2.2. Dades climàtiques i hidrològiques

Les sèries climàtiques de precipitació i temperatura (temperatura màxima i mínima) diàries provenen de set estacions meteorològiques d'Andorra, dues estacions del voltant d'Andorra i una estació d'aforament del Valira a la Seu d'Urgell per al període 2002-2012 presentades a la Taula 3.1.

L'estació d'aforament amb sèries històriques de cabal del riu Valira se situa a la Seu d'Urgell (identificador del SAIH A002) (Figura 3.3). Aquestes dades les facilita la Confederació Hidrogràfica de l'Ebre (SAIH Ebro), i són les disponibles amb una major longitud.



Figura 3.3. Situació de l'estació d'aforament del Valira a la Seu d'Urgell. Font: Elaboració pròpia

Estacions	Latitud	Longitud	Font	Cabal	Precipitació	T màx.	T mín.
Valira Seu d'Urgell	866737,2	4699420,7	SAIH Ebro	X	-	-	-
La Seu d'Urgell (CD)	370960,546	4692139,911	SMC	-	X	X	X
Malniu (Z3)	399579,105	4702246,104	SMC		X	X	X
Central	381189,762	4708044,678	FEDA	-	X	X	X
Engolasters	382156,38	4708163,207	FEDA	-	X	X	X
Ransol	388345,799	4714928,938	FEDA	-	X	X	X
Sorteny	382802,03	4718685,05	CENMA	-	X	X	X
Perafita	383572,98	4702815,01	CENMA	-	X	X	X
Aixàs	374833,03	4704617,99	CENMA	-	X	X	X
Bony Neres	383729,03	4711762,97	CENMA	-	X	X	X

Taula 3.1. Dades disponibles de cabal, precipitació i temperatura (coordenades en UTM ETRS89, X: existència de dada, -: no existeix dada). Fonts: SAIH Ebro (Servei Automàtic d'Informació Hidrogràfica de l'Ebre, SMC (Servei meteorològic de Catalunya, FEDA (Forces elèctriques d'Andorra) i CENMA (Centre d'estudis de la neu i la muntanya d'Andorra))

La informació sobre els usos del sòl ha estat extreta del Mapa de Cobertes del sòl de Catalunya (MCSC) i del CORINE Land Cover (Copernicus, 2012). La Figura 3.4 mostra la classificació dels diferents usos del sòl per a Andorra.

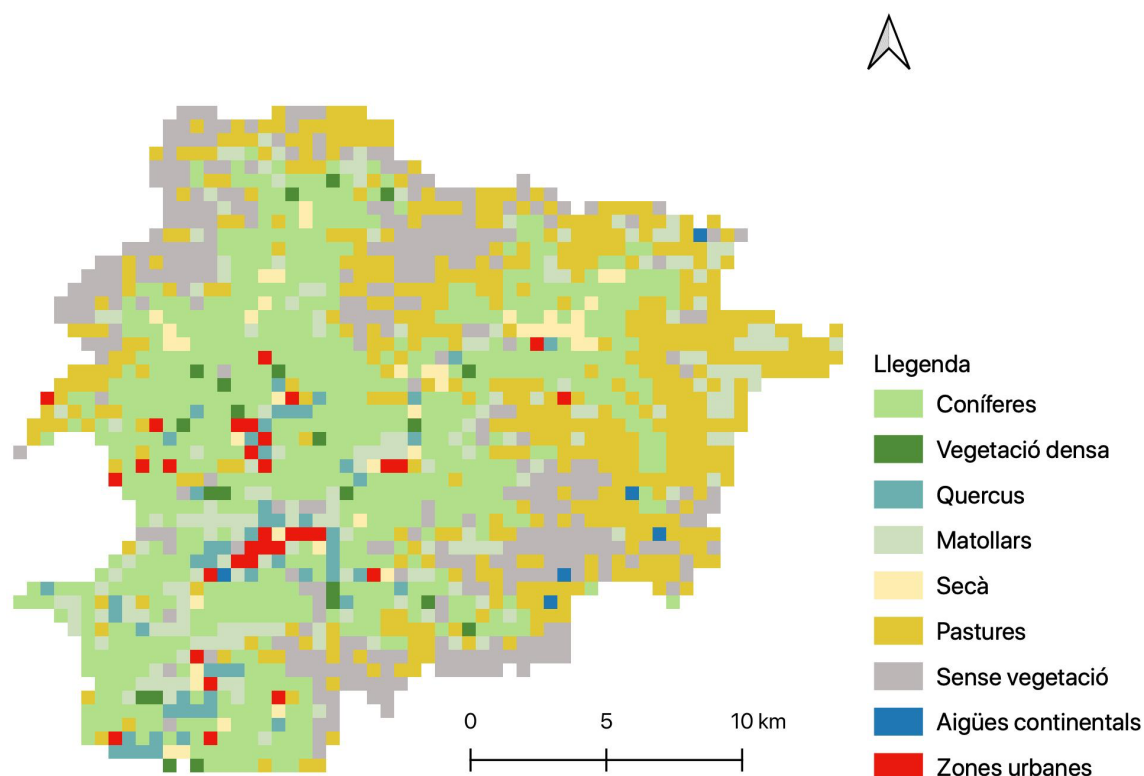


Figura 3.4. Distribució de les categories dels usos del sòl a Andorra. Font: Elaboració pròpia a partir de dades d'usos del sòl extreta del MCSC i el Corine Land Cover

### 3.2.3. Escenaris de canvi climàtic i usos del sòl

Des dels anys seixanta, els models generals de circulació (GCM) proporcionen simulacions de canvis esperats en el clima per a grans resolucions espacials (Manabe, 1971; Smagorinsky, 1963). Avui en dia, continuen sent una eina útil però existeix la necessitat d'augmentar la resolució espacial de les projeccions per tal d'obtenir informació regional més detallada i adequada per a una bona gestió a partir dels models climàtics regionals (RCMs) (Giorgi i Mearns, 1991). Aquests ofereixen una bona visió general del canvi climàtic esperat i els seus impactes.

López-Moreno, Goyette i Beniston (2008) analitzen les incerteses i la magnitud dels canvis esperats de precipitació i temperatura prevista per al 2070 i fins a finals del segle XXI als Pirineus a partir d'una sèrie de models climàtics regionals (RCM). Es fa una anàlisi detallada de la zona dels Pirineus amb la finalitat d'obtenir informació més detallada de les simulacions de canvi climàtic a escala regional. Destacar que els Pirineus

disposen d'una topografia i ubicació que dificulta la reproducció adequada del clima observat i les muntanyes dels Pirineus presenten una àmplia gamma d'altituds entre l'oceà Atlàntic (massa d'aigua relativament fresca) i el mar Mediterrani (massa d'aigua relativament càlida). Aquestes característiques condueixen a una gran heterogeneïtat climàtica a distàncies curtes. Per tant, es tracta d'una zona complexa amb molta variabilitat climàtica que dificulta la reproducció amb precisió de la climatologia observada.

Els RCM aplicats als Pirineus prediuen una disminució mitjana entre el 10,7 % i el 14,8 % de les precipitacions i un augment entre 2,8 °C i 4 °C per al proper segle per a l'escenari més extrem RCP 8.5 (López-Moreno et al., 2008). D'altra banda, els canvis en la precipitació mostren un grau elevat d'incertesa, no seran uniformes i presenten una variabilitat tant espacial com temporal.

Pel cas d'Andorra i com s'ha aprofundit anteriorment en el capítol 2, existeix un estudi (Pons, 2017) sobre les projeccions previstes de canvi climàtic basades en diferents models climàtics regionals disponibles per la zona d'Andorra. Aquestes indiquen un increment de la temperatura mitjana anual a Andorra d'entre 1,3 °C i 1,7 °C per al període 2021-2050 respecte al període 1975-2005, un increment d'entre 1,7 °C i 3 °C per al període 2041-2070 i un increment d'entre 2,2 °C i 5,1 °C per al període 2071-2100. Pel que fa a les precipitacions, es projecta una disminució d'un 3 % del total anual per al període 2021-2050, d'entre un 2 % i un 5 % per al període 2041-2070 i d'entre un 2 % i un 15 % per al període 2071-2100.

Per alimentar el model hidrològic i explorar diferents escenaris possibles s'ha definit una forquilla de canvis en la precipitació i la temperatura en base a aquestes projeccions dels models climàtics disponibles per Andorra. La Taula 3.2 mostra els valors de canvi en la temperatura mitjana anual i la precipitació anual per als diferents escenaris.



Escenaris	t2p0	t2p-20	t4p0	t2p20	t4p-20	t4p20
Temperatura	2 °C	2 °C	4 °C	2 °C	4°C	4°C
Precipitació	0 %	-20 %	0 %	20 %	-20 %	20 %

Taula 3.2. Escenaris de canvi en la temperatura mitjana i la precipitació anual utilitzats per forçar el model hidrològic. Font: Elaboració pròpia

Pel que fa els usos del sòl s'han creat tres escenaris diferents basats en l'evolució de la vegetació. Aquests es combinen amb l'escenari climàtic RCP 4.5 (IPCC, 2014) que podríem considerar com el nostre escenari climàtic t2p0 amb un augment de la temperatura de 2°C i una precipitació del 0 % aproximadament.

El primer escenari AFOR consisteix principalment en la colonització de coníferes de les zones de pastures i matolls en alçada i de zones de matolls en els vessants. El resultat d'aquest escenari s'observa en la Figura 3.5. El bosc guanya terreny degut a l'abandonament de zones de cultiu i pastura, per tant, hi haurà una evolució forestal sense actuació humana. Aquest escenari és una dinàmica i una tendència observada en diferents zones de muntanya com a Andorra degut al canvi d'activitats i especialment a l'abandonament de l'agricultura i la ramaderia (López-Moreno, Zabalza, Vicente-Serrano, Revuelto, Gilaberte, Azorin-Molina, Morán-Tejeda, García-Ruiz, i Tague 2014; Lasanta-Martínez, Vicente-Serrano i Cuadrat-Prats, 2005).



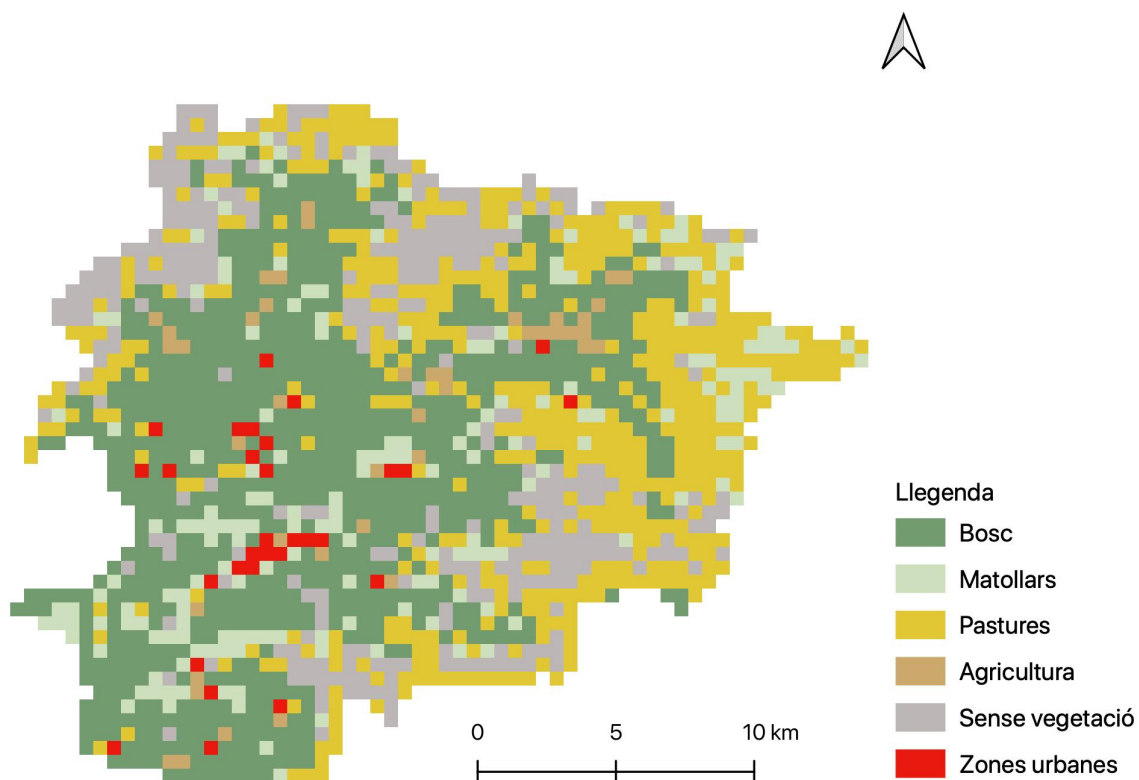


Figura 3.5. Evolució dels usos del sòl per l'escenari AFOR. Font: Elaboració pròpia

El segon escenari FIREFOR preveu capçaleres amb menor superfície forestal com a resultat d'un increment de la incidència d'incendis. La hipòtesi inicial és que els incendis afectaran principalment les coníferes i els matolls convertint zones ocupades per matolls i frondoses (Figura 3.6).

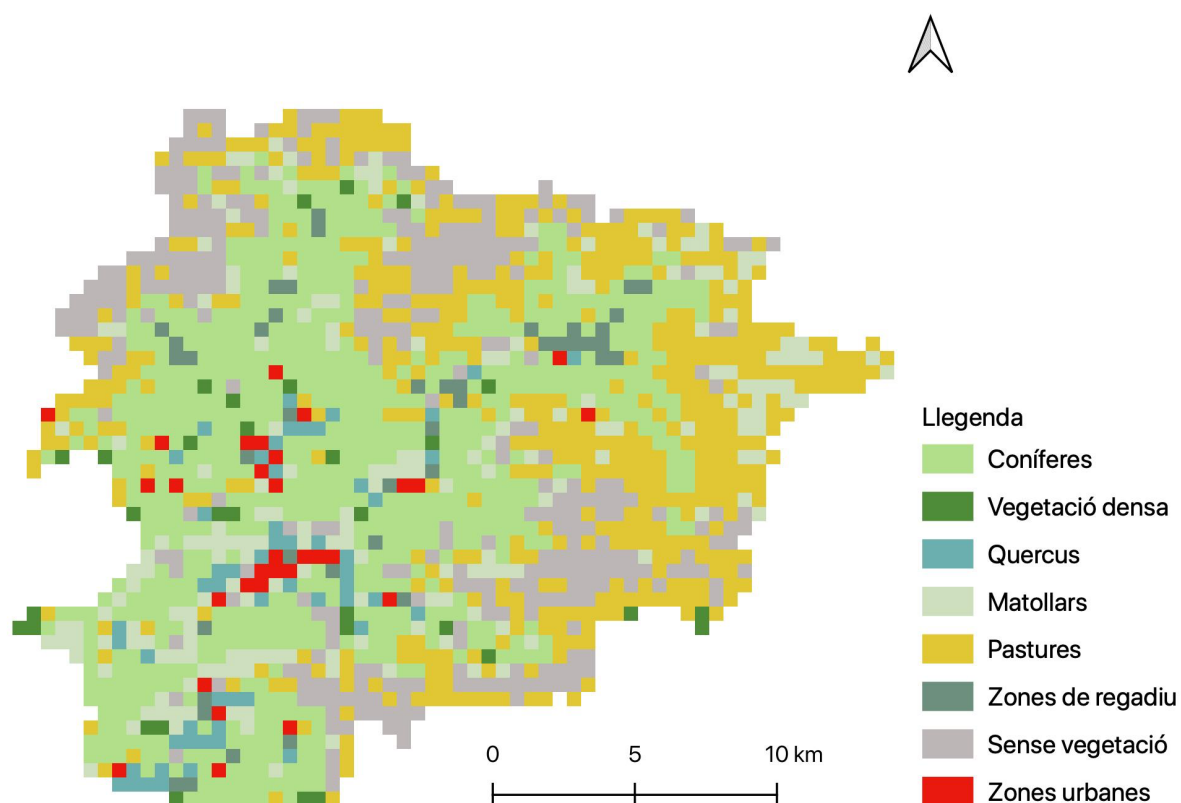


Figura 3.6. Evolució dels usos del sòl per l'escenari FIREFOR. Font: Elaboració pròpia

El tercer escenari MANAGEFOR contempla un canvi en l'estructura forestal degut principalment a l'increment de la gestió del bosc. Es gestiona més superfície del bosc, disminuint la densitat i regenerant. L'escenari preveu que el 50 % de la superfície forestal actual de les capçaleres serà gestionada, actuant primer en els boscos més densos i disminuint el 50 % de la densitat d'ocupació (Figura 3.7).

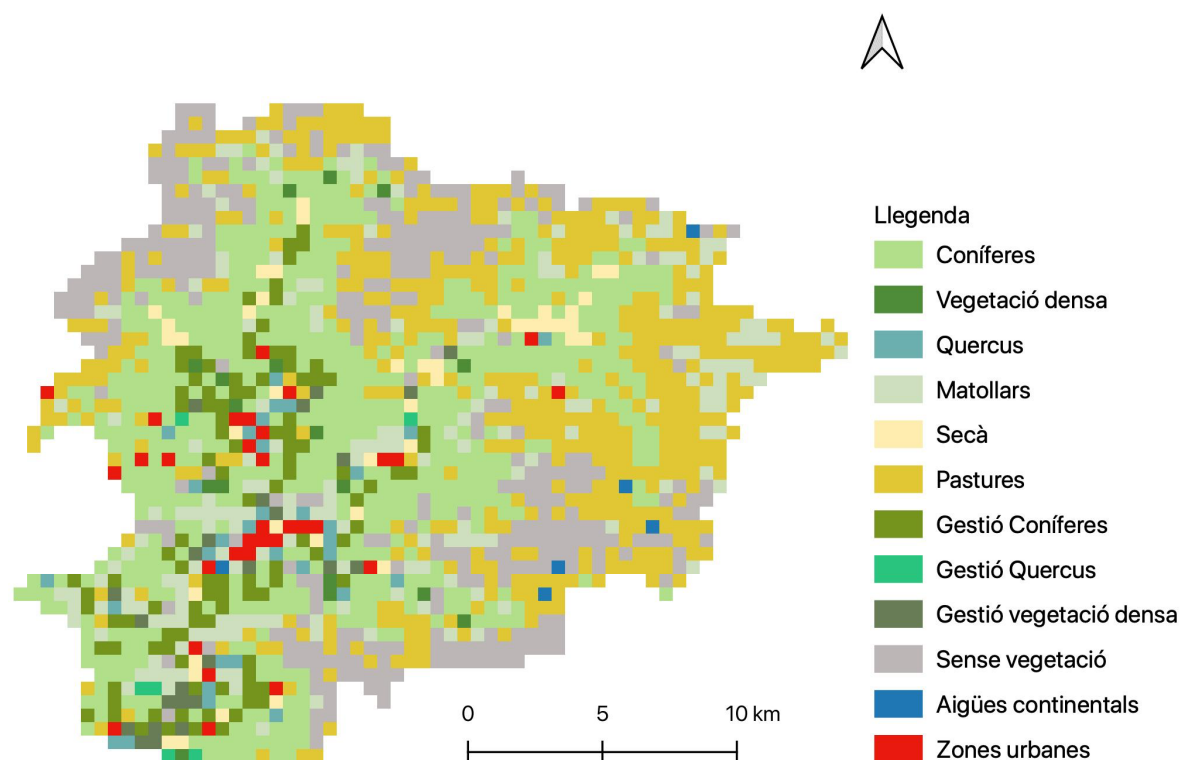


Figura 3.7. Evolució dels usos del sòl per l'escenari MANAGEFOR. Font: Elaboració pròpia

En la Figura 3.8 s'observa el percentatge de cada tipus de sòl ocupat que patirà modificacions segons els diferents escenaris. L'escenari AFOR veurà augmentada la superfície ocupada pel bosc, l'escenari FIREFOR tindrà menys superfície forestal ocupada per l'increment d'incendis i augmentaran les zones de matollars i de vegetació densa. Finalment, l'escenari MANAGEFOR preveu una gestió del bosc disminuint la superfície forestal a partir de la gestió de coníferes, Quercus i vegetació densa.

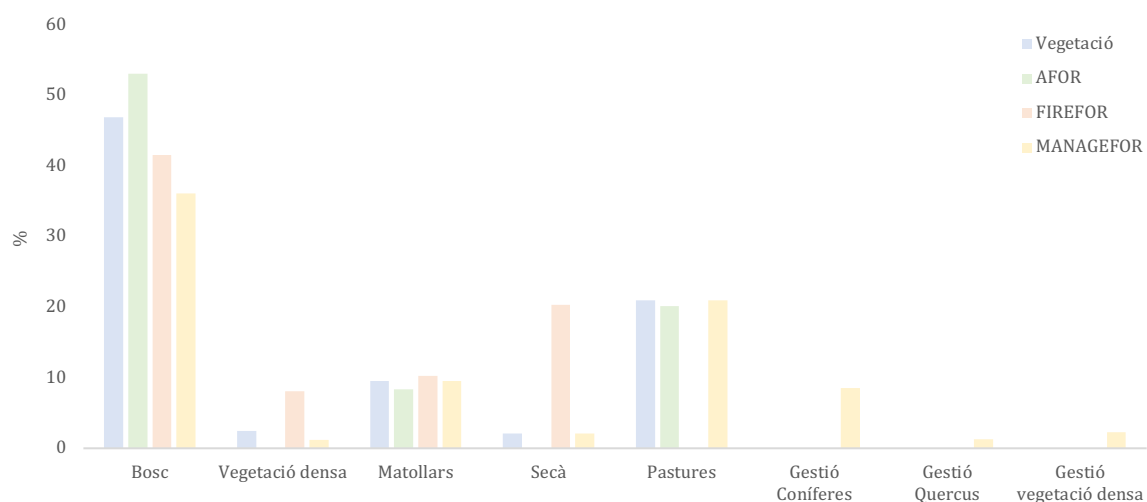


Figura 3.8. Percentatge de tipus de sòl ocupat segons cada escenari. Font: Elaboració pròpia

### 3.2.4. Calibració i Resultats

#### 3.2.4.1. Calibració i validació del model

El model RHESys es calibra amb les dades observades de cabals disponibles de l'estació d'aforament del riu Valira a la Seu d'Urgell ja que és la que es disposa amb una major longitud d'observacions.

La simulació que es mostra a la Figura 3.9 revela que la magnitud, l'evolució i la variació dels cabals es reproduïen correctament. S'utilitza el període 2002-2008 per calibrar el model, mentre que el període 2009-2011 s'utilitza per a la validació. L'eficiència de Nash-Sutcliffe efficiency (NSE), el percentatge de biaix (PBIAS) i l'índex d'error (RMSE) s'utilitzen per quantificar la capacitat del model per reproduir adequadament els cabals mensuals observats. Moriasi et al., (2007) descriuen la formulació matemàtica dels tres índexs així com l'escala de puntuacions. Segons aquesta escala s'aconsegueix un valor de NSE de 0,6 satisfactori, un PBIAS bo de 11,5 % i un RSR de 0,65 satisfactori per la calibració. La validació mostra un resultat satisfactori pel NSE i RSR, amb valors de 0,63 i 0,6 respectivament i un PBIAS bo de 13,1 %. En general, les estadístiques revelen que el model RHESys reproduïx correctament el cabal per a la conca estudiada.

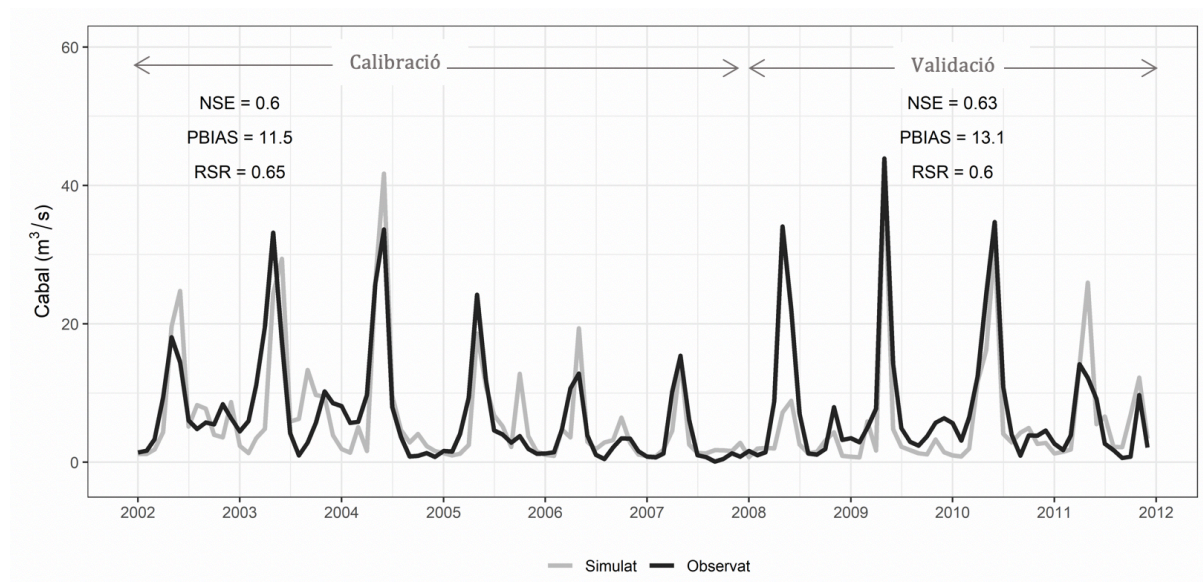


Figura 3.9. Cabal mensual simulat (gris) i observat (negre) després de la calibració dels paràmetres. Font: Elaboració pròpia a partir de la simulació amb el Rhessys i de dades de cabals observats del SAIH Ebro

### 3.2.4.2. Resultats de les simulacions de canvi climàtic

Les simulacions del cabal sota els diferents escenaris de canvi climàtic per a l'horitzó 2050 respecte el període 2002-2011 preveuen una disminució del cabal mig anual del 8,5 % i 14 % per a l'escenari climàtic t2p0 i t4p0 respectivament. Sota l'escenari t2p-20 i t2p20 el cabal mig anual disminuirà un 36% i augmentarà un 24 %. Finalment, el cabal mig anual augmentarà un 16 % i disminuirà un 40,5 % respecte l'escenari climàtic t4p20 i t4p-20, essent aquest últim l'escenari més extrem (Taula 3.3). La majoria d'escenaris climàtics mostren la disminució de cabal més important durant la primavera, mostrant una disminució del cabal de 48 %, 71 %, 67 % i 80 % pels escenaris t2p0, t4p0, t2p-20 i t4p-20 respectivament i avançant el pic de cabal en el temps del mes de juny al mes de maig. De la mateixa manera tots els escenaris experimenten augments de cabal durant els mesos d'hivern, principalment pels efectes dels canvis de la temperatura en la dinàmica nival i un avançament temporal del pic de cabal màxim degut a la fosa prematura de la coberta permanent de neu.

	<b>Simulada (2002-2011)</b>	<b>t2 p0</b>	<b>t2 p20</b>	<b>t2 p-20</b>	<b>t4 p0</b>	<b>t4 p20</b>	<b>t4 p-20</b>
Cabal mig anual (m <sup>3</sup> /s)	8	7,3	9,9	5	6,9	9,3	4,8
Variació (%)		-8,5	24	-36	-14	16	-40,5

Taula 3.3. Resultats del cabal mig anual per l'horitzó 2050 segons els diferents escenaris de canvi climàtic respecte al cabal simulat (2002-2011) i la seva variació. Font: Elaboració pròpia

La Figura 3.10 mostra el cabal mig mensual per al període simulat 2011-2015 i el període futur per a l'escenari climàtic t2p0 i t4p0 mostrant un canvi hidrològic del riu Valira a la Seu d'Urgell. Quan la temperatura augmenta 2°C s'observa un descens del cabal de 8,5 % (passant de 8 m<sup>3</sup>/s de cabal mig anual a 7,3 m<sup>3</sup>/s) i de 14 % (passant de 8 m<sup>3</sup>/s de cabal mig anual a 6,9 m<sup>3</sup>/s) quan la temperatura augmenta 4°C.

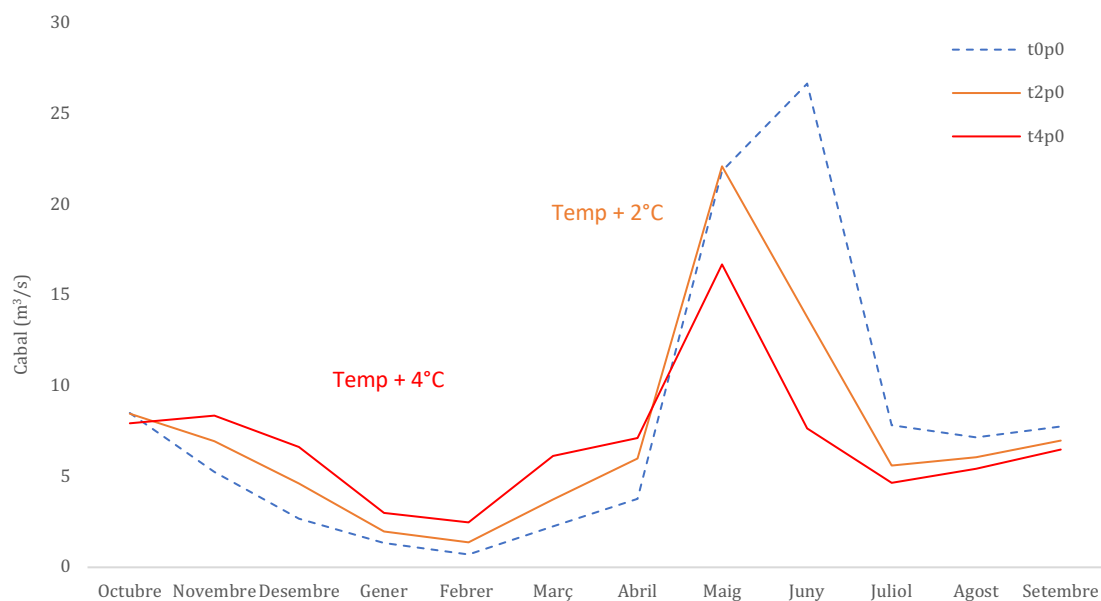


Figura 3.10. Mitjana mensual del cabal del riu Valira per al període simulat 2002-2011 i pels escenaris t2p0 i t4p0. Font: Elaboració pròpia a partir de les sortides de la modelització RHESSys

Quan es combina un augment de la temperatura de 2°C amb un augment o disminució de la precipitació del 20 % aquestes variacions de cabal mostren un augment del cabal del 24 % (passant de 8 m³/s de cabal mig anual a 9,9 m³/s) o una disminució de 36 % (passant de 8 m³/s de cabal mig anual a 5 m³/s) (Figura 3.11).

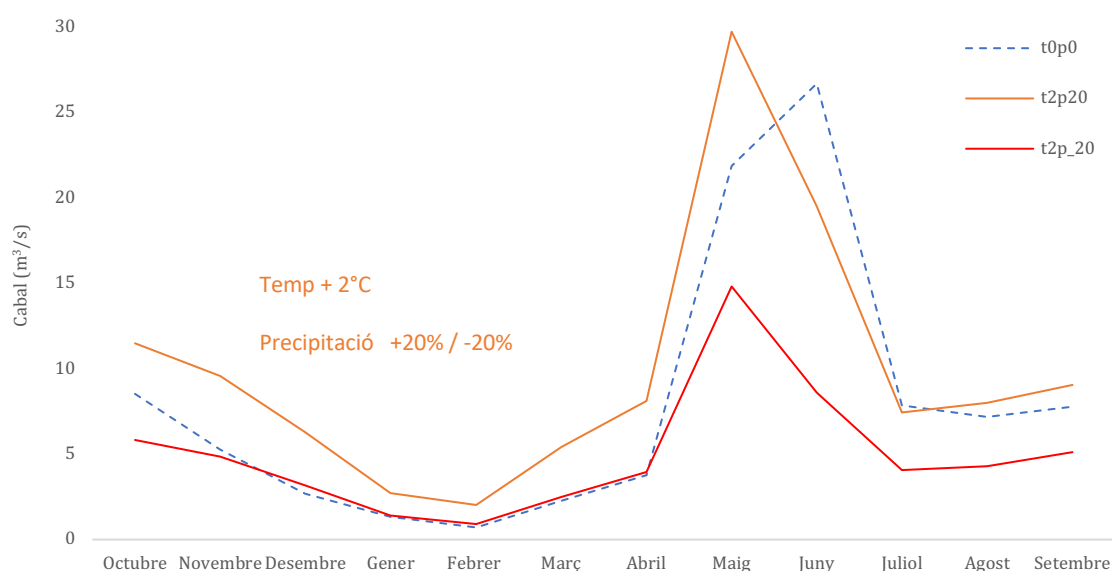


Figura 3.11. Mitjana mensual del cabal del riu Valira per al període simulat 2002-2011 i pels escenaris t2p-20 i t2p20. Font: Elaboració pròpia a partir de les sortides de la modelització RHESSys

Les simulacions en condicions de canvi climàtic quan la temperatura augmenta 4°C i la precipitació augmenta o disminueix un 20 % el cabal respon augmentant un 16 % (passant de 8 m<sup>3</sup>/s de cabal mig anual a 9,3 m<sup>3</sup>/s) i disminuint un 40,5 % (passant de 8 m<sup>3</sup>/s de cabal mig anual a 4,8 m<sup>3</sup>/s) respectivament (Figura 3.12).

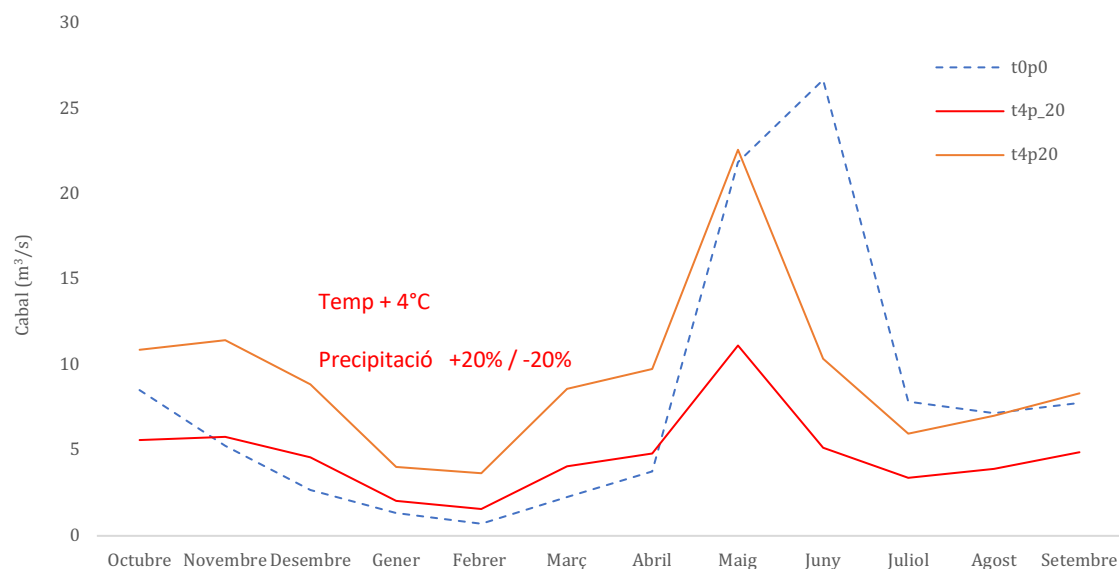


Figura 3.12. Mitjana mensual del cabal del riu Valira per al període simulat 2002-2011 i pels escenaris t4p-20 i t4p20. Font: Elaboració pròpia a partir de les sortides de la modelització RHESys

Per tant, s'observa que la precipitació modula canvis en el nivell global dels cabals marcant la tendència d'increment o disminució mensuals del mateix mentre que la temperatura és la variable que modula principalment canvis en la temporalitat del cabal afegint una variació positiva en la magnitud del canvi en els mesos d'hivern degut a la dinàmica del mantell nival i negativa en els mesos d'estiu degut a la intensificació del procés d'evapotranspiració.

### 3.2.4.3. Resultats de les simulacions combinades d'usos del sòl i climàtiques

L'acció combinada dels escenaris d'usos del sòl i l'escenari climàtic t2p0 equivalent a un RCP 4.5 mostraran disminucions més lleugeres que en els casos anteriors. La Figura 3.13 mostra el règim mitjà de cabal mensual simulat per RHESys per a l'escenari AFOR + t2p0, FIREFOR + t2p0 i MANAGEFOR + t2p0. En general, els règims fluvials no varien gaire, per l'escenari AFOR on el bosc guanya terreny mostra la disminució de cabal més important dels tres escenaris de 8,5 % (de 12,6 m<sup>3</sup>/s de cabal mitjà anual a 11,5 m<sup>3</sup>/s). La diferència més gran es produeix durant els mesos de febrer i

març (-20 % i -22 %). Pels escenaris FIREFOR i MANAGEFOR el cabal anual disminueix de forma similar, una disminució del cabal de 4,6 % (de 14 m³/s de cabal mig anual a 13,3 m³/s) i 4 % (de 14,4 m³/s de cabal mig anual a 13,8 m³/s) respectivament (Taula 3.4). Per aquests dos escenaris la disminució de cabal més important també es dona durant els mesos de febrer i març amb una disminució d’11 % i 17 % respectivament pels dos casos. La resta de l’any els cabals varien molt poc. Si comparem els tres escenaris s’observa que l’escenari on el bosc guanya terreny comporta una disminució de cabal més important que quan es gestiona el bosc.

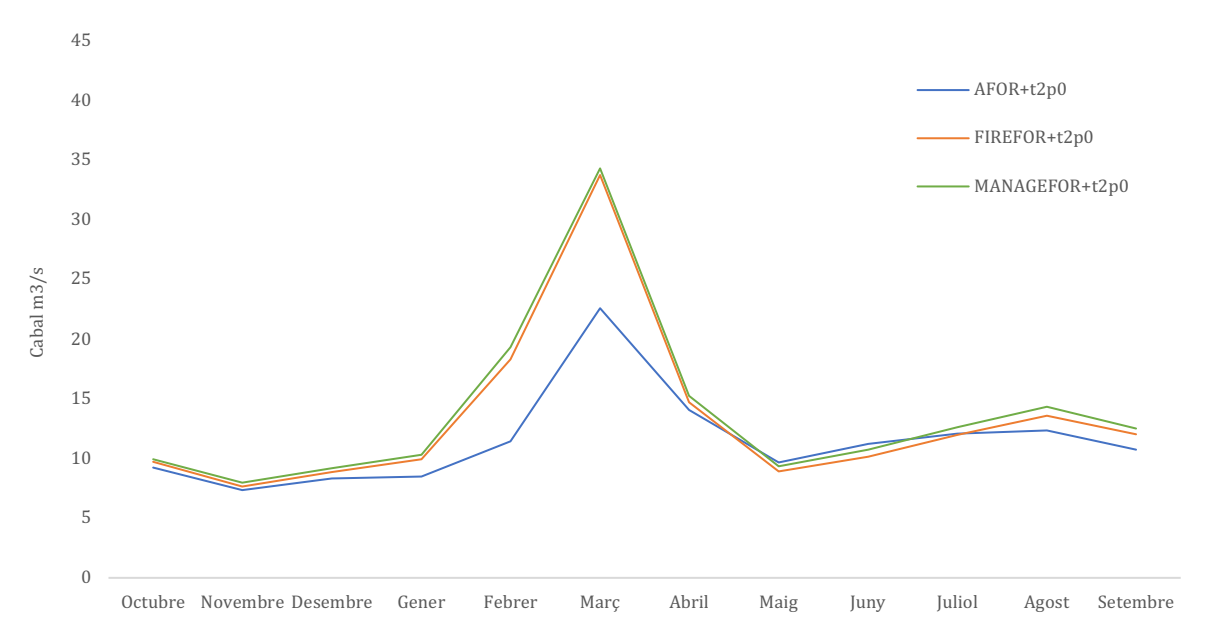


Figura 3.13. Mitjana mensual del cabal del riu Valira per al període simulat 2002-2011 i pels diferents escenaris d’usos del sòl. Font: Elaboració pròpia a partir de les sortides de la modelització RHESSys

	Simulat AFOR (2002-2011)	AFOR + t2p0	Simulat FIREFOR (2002-2011)	FIREFOR + t2p0	Simulat MANAGEFOR (2002-2011)	MANAGEFOR + t2p0
Cabal mig anual (m³/s)	12,6	11,5	14	13,3	14,4	13,8
Variació (%)		-8,5		-4,6		-4

Taula 3.4. Resultats del cabal mig anual segons els diferents escenaris de canvi d’usos del sòl respecte al cabal simulat (2002-2011) i la seva variació. Font: Elaboració pròpia a partir dels resultats de la modelització amb RHESSys

S’observa que tenint en compte canvis tant en el clima com en els usos del sòl afectaran a la hidrologia d’una zona de muntanya de capçalera com és Andorra.



La Figura 3.14 mostra la variació del cabal segons els diferents escenaris climàtics respecte el cabal simulat per al període 2002-2011. S'observa que degut a aquest canvi global els cabals augmentaran principalment durant l'hivern mentre que durant els mesos de primavera i estiu se'n preveu una disminució. La magnitud del canvi dependrà de l'escenari climàtic considerat, especialment en funció del canvi que es produeixi en la precipitació. Els models mostren una gran incertesa i variació de la variable precipitació en funció del model climàtic utilitzat, d'aquí a que s'analitzi el rang possible de canvis d'entre un +20 % i un -20 % en les precipitacions.. L'augment de cabal durant l'hivern va relacionat molt probablement amb els canvis en la dinàmica nival degut a les variacions de la temperatura. D'altra banda, els canvis projectats en la temperatura preveuen un avançament temporal i un augment de la velocitat del procés de fosa de la capa de neu permanent i una disminució de la quantitat de neu que s'acumula durant la temporada d'hivern que es trasllada en un avançament temporal i una disminució del pic màxim anual de cabal.

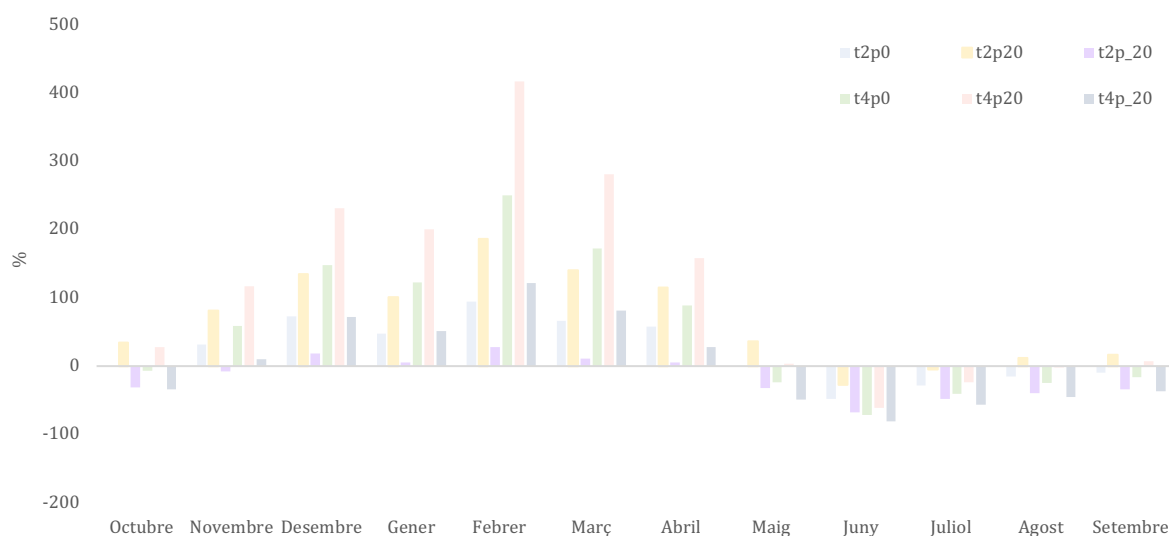


Figura 3.14. Variació (%) mensual del cabal dels diferents escenaris respecte el cabal simulat pel període 2002-2011. Font: Elaboració pròpia

Si observem els canvis d'usos del sòl combinats mostren una disminució del cabal menys significativa ja que tenen un impacte menor que els efectes del canvi climàtic. Tot i que l'efecte de la revegetació on el bosc guanya terreny (escenari AFOR) mostra una reducció del cabal mig anual del 8,5 % a l'horitzó 2050, aquest valor és similar a l'efecte de l'augment de la temperatura de 2°C fet que mostra que es necessari tenir en compte

l'efecte combinat del canvi climàtic i dels usos del sòl sobre el cabal. Aquest escenari, equivalent a la tendència actual, mostra com la dinàmica d'abandonament dels conreus i les pastures està contribuint a intensificar els efectes de disminució dels cabals degut al canvi climàtic.

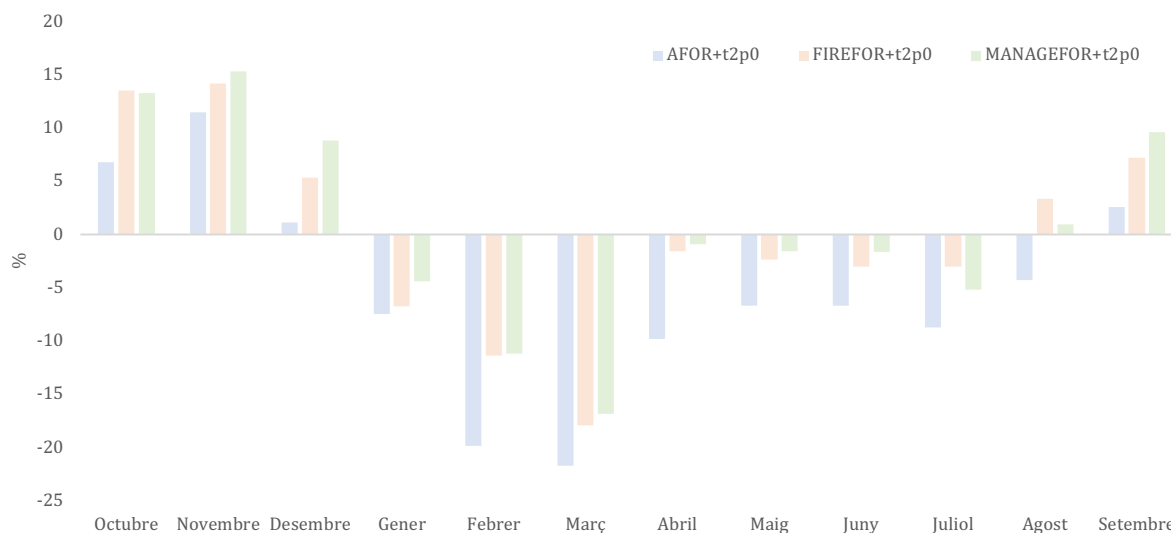


Figura 3.15. Variació (%) mensual del cabal dels diferents escenaris d'usos del sòl respecte el cabal simulat pel període 2002-2011. Font: Elaboració pròpia

Per contra, l'escenari que contempla un increment de la gestió forestal, s'observa com l'adopció més significativa d'aquesta pràctica permetria mitigar les reduccions de cabal degudes al canvi climàtic especialment durant els mesos d'estiu (Figura 3.15). Per tant, els resultats mostren que el principal motor del canvi hidrològic és el canvi en el clima. No obstant, els canvis en els usos del sòl i la seva gestió poden tenir efectes o intensificadors o mitigadors dels impactes sobre el recurs hídric per exemple a través d'una gestió forestal sostenible de les zones de capçalera.

Els diferents escenaris de canvi projectat de canvi climàtic i d'usos del sòl són els que ens serviran per alimentar el model WEAP-Andorra i modelitzar de forma integral el recurs i la demanda hídrica.

### 3.3. Punts clau del capítol

- Les simulacions del cabal per als diferents escenaris climàtics preveuen una disminució del cabal mig anual de 8,5 %, 14 %, 36 % i 40,5 % per als escenaris

t2p0, t4p0, t2p-20 i t4p-20 i un augment del cabal de 24 % i 16 % per als escenaris t2p20 i t4p20.

- La majoria d'escenaris projecten una disminució del cabal més important durant la primavera i un avançament temporal del pic de cabal màxim del mes de juny al mes de maig degut a la fosa prematura de la coberta permanent de neu. De la mateixa manera tots els escenaris experimenten lleugers augments de cabal durant els mesos d'hivern, principalment pels efectes dels canvis de la temperatura en la dinàmica nival.
- Pel que fa als efectes en el cabal dels canvis en els usos del sòl, aquests són menys significatius. Per als escenaris AFOR+t2p0, FIREFOR+t2p0 i MANAGEFOR+t2p0 el cabal disminuirà un 8,5 %, 4,6 % i 4 %.
- L'efecte de la revegetació on el bosc guanya terreny (AFOR) mostra una reducció del cabal mig anual més important que la resta. Aquest escenari, equivalent a la tendència actual, mostra com la dinàmica d'abandonament dels conreus i les pastures està contribuint a intensificar els efectes de disminució dels cabals degut al canvi climàtic.
- L'escenari que contempla un increment de la gestió forestal (MANAGEFOR), s'observa com l'adopció més significativa d'aquesta pràctica permetria mitigar les reduccions de cabal degudes al canvi climàtic.

### 3.4. Referències

- Band, L. E., Patterson, P., Nemani, R., & Running, S. W. (1993). Forest ecosystem processes at the watershed scale: incorporating hillslope hydrology. *Agricultural and Forest Meteorology*, 63(1-2), 93-126. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(93\)90024-C](https://doi.org/10.1016/0168-1923(93)90024-C)
- Band, L. E., Tague, C. L., Brun, S. E., Tenenbaum, D. E., & Fernandes, R. A. (2000). Modelling Watersheds as Spatial Object Hierarchies: Structure and Dynamics. *Transactions in GIS*, 4(3), 181-196. <https://doi.org/10.1111/1467-9671.00048>
- Cartig, Roger (2019). El mapa de les cobertes del sòl del 1948, el més antic de la sèrie CENMA. *Art de viure, Geografia*; p. 0175-0179.
- Copernicus (2012). CORINE Land Cover.
- García-Ruiz, J. M., & Lana-Renault, N. (2011b). Hydrological and erosive consequences of

- farmland abandonment in Europe, with special reference to the Mediterranean region – A review. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.01.003>
- García-Ruiz, J. M., López-Moreno, J. I., Vicente-Serrano, S. M., Lasanta-Martínez, T., & Beguería, S. (2011a). Mediterranean water resources in a global change scenario. *Earth-Science Reviews*, 105(3–4), 121–139. <https://doi.org/10.1016/J.EARSCIREV.2011.01.006>
- Giorgi, F., & Mearns, L. O. (1991). Approaches to the simulation of regional climate change: a review. *Reviews of Geophysics*, 29(2), 191–216.
- IPCC. (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Vol. 9781107025). <https://doi.org/10.1017/CBO9781139177245.003>
- Lammers, R. B., Band, L. E., & Tague, C. L. (1997). Scaling behaviour of watershed processes. *Vangarding P, Foodyand G, Curran p, Editors. Scaling-up. Cambridge University Press*, 295–318.
- Lasanta-Martínez, T., Vicente-Serrano, S. M., & Cuadrat-Prats, J. M. (2005). Mountain Mediterranean landscape evolution caused by the abandonment of traditional primary activities: a study of the Spanish Central Pyrenees. *Applied Geography*, 25(1), 47–65.
- López-Moreno, J. I., Goyette, S., & Beniston, M. (2008). Climate change prediction over complex areas: spatial variability of uncertainties and predictions over the Pyrenees from a set of regional climate models. *International Journal of Climatology*, 28(11), 1535–1550. <https://doi.org/10.1002/joc.1645>
- López-Moreno, J. I., Zabalza, J., Vicente-Serrano, S. M., Revuelto, J., Gilaberte, M., Azorin-Molina, C., Morán-Tejeda, E. García-Ruiz, J.M. & Tague, C. (2014). Impact of climate and land use change on water availability and reservoir management: Scenarios in the Upper Aragón River, Spanish Pyrenees. *Science of The Total Environment*, 493, 1222–1231. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2013.09.031>
- Manabe, S. (1971). Estimates of future changes of climate due to increase of carbon dioxide concentration in the air. In *Man's Impact on Climate* (p. 256). MIT Press Cambridge, Mass.
- Mengistu, S. G., Ali, M. A., & Yassin, F. A. (2016). Assessment of the Sensitivity of Streamflow Simulations to Changes in Patch Resolution Using GIS Based Hydro-

- Ecologic Model. *Open Journal of Modern Hydrology*, 06(02), 66–78.  
<https://doi.org/10.4236/ojmh.2016.62007>
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885–900.
- Pons, M. (2017). *Informe sobre els Escenaris de Canvi Climàtic a Andorra*.
- Sanford, E. (2005). *Scale-dependence of natural variability of stream flow parameters in a forested drainage basin on the Boreal Shield*. Faculty of Graduate Studies, University of Western Ontario.
- Smagorinsky, J. (1963). General circulation experiments with the primitive equations: I. The basic experiment. *Monthly Weather Review*, 91(3), 99–164.
- Tague, C. L., & Band, L. E. (2004). RHESys : Regional Hydro-Ecologic Simulation System — An Object- Oriented Approach to Spatially Distributed Modeling of Carbon, Water, and Nutrient Cycling. *Earth Interactions*, 8(19), 1–42.

## **4. CARACTERITZACIÓ DE LA DEMANDA D'AIGUA A ANDORRA**

---

### **4.1. Recurs hídric i model de gestió**

#### **4.1.1. Directiva Marc de l'Aigua (DMA)**

#### **4.1.2. Demanda d'aigua**

#### **4.1.3. Consum d'aigua en el turisme**

### **4.2. Punts clau del capítol**

### **4.3. Referències**

## **4. CARACTERITZACIÓ DE LA DEMANDA D'AIGUA A ANDORRA**

---

### **4.1. Recurs hídric i model de gestió**

#### **4.1.1. Directiva Marc de l'Aigua (DMA)**

L'aigua és un bé indispensable per a la vida i en els últims anys ha esdevingut un tema preocupant degut a l'escassetat i mala gestió del recurs. Es per això que cada cop existeixen més normatives per gestionar el recurs de forma més sostenible, conservant tant la seva quantitat com la seva qualitat.

Una d'elles és La Directiva Marc de l'Aigua (DMA) creada el 2000, és l' instrument d'aplicació obligada pels diferents membres de la Unió Europea en el marc d'actuació comuna sobre la gestió de l'aigua. L'objectiu principal no només se centra en satisfer la demanda creixent (usos i explotació), sinó també equilibrar els diferents usos que en fem amb la necessitat pròpia del medi i la seva conservació (rius, aqüífers, etc.).

A finals del 2000 la Comissió i el Parlament europeus van aprovar i publicar la Directiva marc de l'aigua (2000/60/CE). Aquesta intenta donar un marc d'actuació comuna sobre la gestió de l'aigua a tots els estats membres de la Unió Europea.

Els principis bàsics de la DMA són :

- Principi de no-deteriorament i assoliment del bon estat integral de les masses d'aigua superficials i subterrànies (Masses d'aigua)
- Principi de l'enfocament combinat de la contaminació i gestió integrada del recurs (Gestió)
- Principi de plena recuperació de costos dels serveis relacionats amb l'aigua i l'ús dels espais aquàtics (Recuperació dels costos)
- Principi de participació pública i transparència en les polítiques de l'aigua (Participació)
- Protecció de les aigües
- La finalitat de la Directiva és aconseguir un bon estat de l'aigua a través de mesures hidrològiques, ecològiques, econòmiques i socials (Mesures)

La DMA marca un calendari i defineix les etapes que s'han de respectar per a assolir diferents fites mitjançant la definició d'objectius ambientals i ecològics. El resultat serà la millora de la quantitat i la qualitat de les aigües. Durant la seva aplicació serà necessari tenir en compte tots els factors que formen part de la gestió dels recursos hídric, és a dir, els aspectes ambientals, econòmics i socials.

L'aplicació de la DMA en els països membres de la Unió Europea ha començat després de la seva publicació l'any 2000. La seva implementació durant aquests anys ha evidenciat diversos aspectes que necessiten una anàlisi més profunda de les relacions entre el cicle integral de l'aigua i els components ambientals, econòmics i socials d'un país. Entre aquests aspectes és evident que cal tenir en compte els impactes del canvi climàtic, d'importància fonamental per al desenvolupament d'una estratègia de gestió sostenible de les aigües europees. És evident que la gestió sostenible de l'aigua no pot prescindir de les perturbacions climàtiques que estan ocorrent, que afectaran la disponibilitat i qualitat dels recursos hídric i que cada vegada es produiran amb més freqüència a Europa i arreu del món. La implantació de la DMA és un procés gradual que, començant per la identificació de les masses d'aigües, i passant per la definició de les pressions principals i d'uns programes de mesures per compensar-les, acaba amb la definició d'uns plans de gestió de conca. Al llarg d'aquest procés hi ha diverses etapes intermèdies d'importància fonamental que, segons les condicions futures previstes, s'haurien d'enfocar des del principi considerant els impactes del canvi climàtic (Galbiati, 2015).

La implantació de la DMA i les estratègies d'adaptació i mitigació del canvi climàtic són dos processos que no es poden desenvolupar sense considerar les seves interaccions, sinergies i contradiccions. En l'estat actual, molts dels objectius de la DMA no es podran assolir a causa de les pressions antropogèniques sobre les masses d'aigua. L'impacte del canvi climàtic afegeix una altra variable de complexitat en aquest sistema.

La Comissió Europea ha posat en marxa un mecanisme de cooperació i col·laboració entre els països que hauria de portar a la definició d'unes estratègies i unes metodologies comunes per a conciliar la implantació de la Directiva i el control dels impactes del canvi climàtic. En aquest sentit, en els plans de gestió de conca és necessari considerar el canvi climàtic com un dels factors més importants en la definició dels



objectius que s'han de complir, en el disseny dels programes de mesures que cal implantar i en la definició d'objectius, tot i que previsiblement no serà viable assolir-ho durant la primera fase d'aplicació de la DMA (2015) (Galbiati, 2015).

Per a Andorra la DMA no és obligatòria però esdevé un sistema de referència per tal de realitzar una gestió integrada i sostenible del recurs hídric. En el context d'Andorra existeix una normativa anomenada “Llei de policia i protecció de les aigües, del 31 de juliol del 1985” (Consell General Andorra la Vella, 1985) que recull una sèrie d'objectius com:

- Garantir la salubritat i la higiene de les aigües destinades al consum humà o animal
- Garantir les condicions higièniques i sanitàries de les piscines i de llurs instal·lacions
- Establir els requisits per a la declaració i aprofitament de les aigües termals i minerals
- Regular l'evacuació de les aigües residuals
- Garantir la protecció de les aigües superficials

El Govern d'Andorra per tal de preservar la qualitat del recurs hídric del país i, per tant, de controlar i regular els abocaments d'aigües residuals, seguint les directives europees en matèria de gestió de l'aigua, el 18 de desembre de 1996 publica un nou reglament de control de les aigües residuals i de protecció de les aigües superficials (Govern d'Andorra, 1996). Aquesta llei té per objectiu desenvolupar la Llei de policia i protecció de les aigües, del 31 de juliol de 1985, pel que fa a les aigües residuals i a les aigües superficials.

Pel que fa les aigües superficials (Govern d'Andorra, 2020b), el Pla de sanejament presentat l'any 1996, fixava uns objectius de qualitat per l'horitzó 2020. Des de l'aprovació de la Directiva europea marc de l'aigua, els objectius dels Estats membres són l'assoliment d'un bon estat ecològic de les masses d'aigua, per tant, així ha de ser també en el marc del Principat d'Andorra, si més no, pels cursos transfronterers. Els objectius del Pla de sanejament de l'any 1996, eren l'assoliment d'unes qualitats excel·lent i bones en tot el territori andorrà i aquest objectiu no dista tant dels objectius de caire més genèric de la Directiva europea marc de l'aigua, 2000/60/CE.

Per a les aigües subterrànies (Govern d'Andorra, 2020b), durant el 2006 i 2007 el Govern d'Andorra ha elaborat l'estudi relatiu a les aigües subterrànies del Principat d'Andorra a fi de definir i caracteritzar les masses i els cursos d'aigües subterrànies des de la perspectiva que defineix la Directiva europea Marc de l'Aigua 2000/60/CE.

Referent al pla de sanejament de les aigües a Andorra (Govern d'Andorra, 2020c), l'any 1996 el Govern va aprovar el Pla de sanejament de les aigües d'Andorra, el qual preveu totes les actuacions que s'han de dur a terme per obtenir uns nivells de qualitat de les aigües al riu de bons a excel·lents el 2020. Aquesta qualitat de les aigües asseguraria com a mínim una qualitat apta per al bany i la vida piscícola i com a màxim una qualitat apta per a la producció d'aigua potable. Els objectius d'aquest pla es basen en:

- la reducció progressiva de la contaminació de les aigües i les lleres dels rius seguint les directrius europees relatives al tractament de les aigües residuals
- el manteniment de cabals mínims als rius
- la prevenció de la contaminació dels aquífers
- l'establiment dels mecanismes de control derivats de les normatives implantades
- la promoció de la consciència social del bon ús que s'ha de fer del recurs hídric.

El Pla de sanejament del Principat d'Andorra compta quatre sistemes principals de sanejament on les actuacions són relativament similars, és a dir que s'hi ha previst una xarxa de col·lectors generals que recull totes les aigües brutes procedents de les xarxes comunals, així com al final de la xarxa, la construcció d'una Estació depuradora d'aigües residuals (EDAR).

Els quatre sistemes de sanejament són els següents:

- Sistema Arieja: recull les aigües residuals del Pas de la Casa
- Sistema nord occidental: recull les aigües residuals del Serrat, passant per Ordino, i La Massana. Intercepta els col·lectors secundaris de Pal-Arinsal, i d'Anyòs. Paral·lelament, es saneja el Camp de Neu d'Ordino-Arcalís, amb dos sanejaments autònoms.

- Sistema nord oriental: recull les aigües residuals des de Soldeu, seguint el Valira d'Orient fins a Canillo. En el seu recorregut, intercepta el col·lector secundari de la Vall d'Incles.
- Sistema sud: recull les aigües residuals des d'Encamp fins a Sant Julià de Lòria, passant per Escaldes-Engordany i Andorra la Vella.

#### 4.1.2. Demanda d'aigua

Des del punt de vista de l'equitat, hi ha dos conceptes clau en el àmbit dels serveis d'aigua: l'accés i l'assequibilitat. Estan molt relacionades i totes dues qüestions estan estretament vinculades amb el preu de l'aigua. Si els preus de l'aigua es fixen més enllà del que els usuaris poden pagar, aquests seran exclosos de l'accés als serveis (García-Valiñas, Martínez-Espiñeira i González-Gómez, 2010).

Per avaluar el problema de la regulació dels preus de l'aigua es proposen varies mesures d'assequibilitat on la majoria divideixen les despeses d'aigua per un índex de compra (despeses, ingressos, etc.) (Herrington, Newborne i Saade-Hazin, 2003; Reynaud, 2008). Però presenten un problema significatiu ja que en els països desenvolupats no tota l'aigua consumida en les llars s'utilitza per satisfer les necessitats bàsiques.

Una vegada calculat l'indicador d'accessibilitat algunes institucions internacionals com el Banc Mundial o l'OCDE suggereixen que les factures d'aigua no han d'excedir el 3-5 % dels ingressos d'una llar (Herrington et al., 2003; OCDE, 2010). Altres estudis com el de Reynaud (2008), defineixen una llar "*waterpoor*" com una llar que gasta 3 % o més del seu ingrés per al pagament del servei de l'aigua. Aquest tipus de mesures tenen problemes d'interpretació, sobretot en els països desenvolupats, on un component substancial del consum mitjà d'aigua correspon a un ús no estrictament bàsic, és a dir, corresponen a usos dits "de luxe" (com per exemple, el consum a l'aire lliure per a les piscines, pel reg de jardins o pel rentat de cotxes) i no seria coherent amb la idea d'assequibilitat de l'aigua (García-Valiñas et al., 2010).

La demanda d'un bé se suposa que depèn dels ingressos dels consumidors, del preu del bé i de la disponibilitat i els preus de tots els altres béns que són substituïts o complements, així com les preferències del consumidor. Molts especialistes han

considerat el supòsit de separabilitat de l'aigua respecte a altres béns, per tant, el consum d'aigua a les llars no dependrà del preu d'altres béns de consum. En primer lloc, ja que la majoria dels usos de l'aigua d'interior (higiene personal, neteja, etc.) no tenen bons substituïts. En segon lloc, els hàbits domèstics es poden considerar constants, almenys a curt termini. I en tercer lloc, els béns complementaris relacionats amb el consum d'aigua domèstica són típicament equipaments durables (rentadores, aparells sanitaris, etc.) sent poc probable la necessitat de canviar-los a curt termini en reacció a un canvi de preu de l'aigua (Reynaud, Pons i Pesado, 2018).

Una manera senzilla de mesurar les relacions entre el preu de l'aigua i el consum d'aigua en les llars, i entre els ingressos de la llar i el consum d'aigua en la llar és calcular l'elasticitat del preu de la demanda d'aigua i l'elasticitat dels ingressos de la demanda d'aigua. L'elasticitat del preu de la demanda d'aigua mesura la capacitat de resposta (o elasticitat) de l'ús de l'aigua a un canvi en el preu de l'aigua. De la mateixa manera, l'elasticitat dels ingressos de la demanda d'aigua mesura la capacitat de resposta (o elasticitat) de l'ús de l'aigua a un canvi en els ingressos de la llar. En realitat l'aigua d'ús domèstic consisteix en l'ús directe de l'aigua de beguda (generalment representa una petita part del consum total d'aigua) i per altra banda, l'ús indirecte on s'utilitza l'aigua per altres activitats domèstiques com rentar, cuinar, l' higiene, el rec, etc. Per tant, l'aigua és una necessitat en les llars i no té substituït. Atès que no sempre és possible separar els diferents tipus de demanda, les elasticitats estimades es basen generalment en una demanda de les llars agregada (Reynaud et al., 2018).

Per calcular la demanda d'aigua domèstica existeix una àmplia varietat de formes funcionals que s'han aplicat en la literatura, incloent formes lineals, formes de logaritme semi o dobles i formes més complexes, com la funció de Stone-Geary que permet identificar un volum d'aigua que cobreix les necessitats bàsiques. La literatura existent però, no és molt informativa sobre la millor opció, tot i que el model de doble-log és el més utilitzat per la demanda d'aigua domèstica (Reynaud et al., 2018).

Els economistes se centren en el càlcul de les elasticitats del preu amb l'estimació de la demanda d'aigua utilitzant models econòmics de la forma  $Q_d = f(P, Z)$  per relacionar el consum d'aigua en certa mesura amb el preu de l'aigua ( $P$ ) i un conjunt de variables

explicatives (Z), com els ingressos, variables climàtiques, la població resident per llar, les característiques de l'habitatge, la freqüència de la facturació i el disseny de tarifes i l'ús de l'aigua a l'interior o a l'exterior (Arbués, García-Valiñas i Martínez-Espiñeira, 2003).

La demanda d'aigua a la majoria dels casos s'estima com més aviat inelàstica. Això és perquè l'aigua no té substituïts per als usos bàsics i perquè l'abonat presenta un baix nivell de percepció de l'estructura de tarifes ja que les factures d'aigua solen representar una petita proporció dels ingressos (Arbués, Barberán i Villanúa, 2000).

D'altra banda, Alcamo, Flörke i Märker (2007) estudien diferents casos de com afecta el canvi climàtic (a partir d'escenaris definits per l'IPCC) però també canvis socioeconòmics al recurs hídric a través d'una modelització. L'estrès hídric canvia significativament segons la conca hidrogràfica i la intensitat del canvi dependrà de la situació geogràfica. Segons els escenaris analitzats en aquest estudi, l'augment de l'estrès hídric es produeix principalment per l'augment de les captacions d'aigua, i el factor més important d'aquest augment és el creixement de l'ús domèstic de l'aigua, seguit d'un augment de l'ús d'aigua per a la indústria i l'agricultura. Tot i que el creixement de la població té un paper directe important en l'augment del nombre de consumidors d'aigua al sector domèstic, es va trobar que el factor més important era l'augment dels ingressos, que estimula l'ús de l'aigua per càpita en el sector domèstic.

La principal causa de la disminució de l'estrès hídric és la major disponibilitat d'aigua a causa de l'augment de la precipitació anual relacionada amb el canvi climàtic.

L'anàlisi d'escenaris també indica que les millores tecnològiques en l'eficiència de l'ús de l'aigua podrien frenar significativament l'augment de l'ús de l'aigua en tots els sectors dels països en desenvolupament. Alcamo et al. (2007) destaquen que cal estudiar amb més detall l'impacte futur d'aquest factor potencialment significatiu i es necessita una millor representació de tots els processos socioeconòmics en els estudis mundials sobre l'aigua.

#### **4.1.2.1. Demanda d'aigua a Andorra**

Els usos de l'aigua són variables en l'espai segons les activitats econòmiques desenvolupades en cada territori. Hi ha zones que consumeixen la major part de l'aigua

en l'agricultura, altres destinen aquest recurs al turisme, la indústria, la generació d'energia o al consum domèstic. Malgrat que els usos de l'aigua evolucionen amb el temps, i generalment cada vegada es necessita més aigua, el recurs hídric, a llarg termini i de mitjana es manté constant. Això comporta, en algunes ocasions, privilegiar alguns usos en detriment d'altres quan s'arriba a una despesa equivalent al recurs disponible. Per tant, serà important conèixer els usos actuals i les previsions d'usos futurs de l'aigua per a gestionar de forma sostenible el recurs i fer una bona planificació hidrològica i econòmica (Govern d'Andorra, 2020d).

Referent a la demanda d'aigua, el Govern d'Andorra estima el consum per habitant a 220 litres/habitant/dia. Quantifica la despesa d'aigua total durant el 2018 de 114 hm<sup>3</sup>/any (4100 litres/dia/càpita). D'aquests 114 hm<sup>3</sup>/any, en relació al conjunt de cabals captats per a usos consumptius suposa un total de 13,2 hm<sup>3</sup>/any relacionats amb la despesa domèstica, industrial, agrícola i ramadera. Els 100,9 hm<sup>3</sup>/any restants corresponen als usos no consumptius que inclouen els usos hidroelèctrics, l'aqüicultura i la fabricació de neu artificial.

Si s'observa la Figura 4.1 del conjunt dels 114 hm<sup>3</sup>/any d'aigua extrets el 2018, el 86 % correspon a la producció d'energia hidroelèctrica (FEDA i Nord Andorrà), el 10 % per al consum domèstic i al voltant del 3 % per a aigua de reg i canons de neu. La resta d'activitats han consumit un total d'un 1 % (Govern d'Andorra, 2018a).

Entenem per a usos consumptius l'aigua captada que s'utilitza i es torna al medi amb una qualitat i/o quantitat inferior i usos no consumptius l'aigua que s'utilitza es torna al medi sense modificar la seva quantitat ni qualitat.

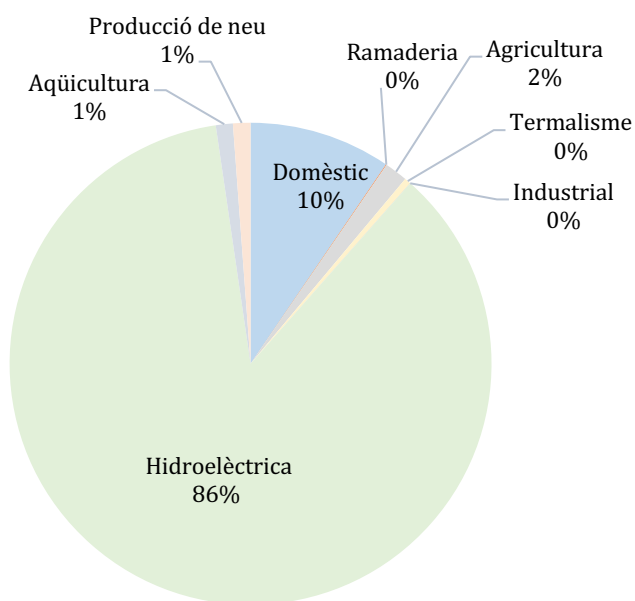


Figura 4.1. Distribució de la despesa hídrica. Font: Govern d'Andorra, 2020d

El recurs hídric disponible en el conjunt d'unitats hidrogeològiques (Govern d'Andorra, 2007) s'ha calculat que és de 344 hm<sup>3</sup>/any, segons els resultats del balanç hídric (Govern d'Andorra, 2018b), i s'estima que s'ha extret el 33 % d'aquest recurs. Un 4 % del recurs captat ha estat en concepte d'ús consumptiu (Govern d'Andorra, 2018a).

Si s'observa la Figura 4.2 es pot veure un resum de la despesa hídrica des del 2007 al 2018 on es veu que gran part del consum d'aigua és destinat a la producció d'energia hidroelèctrica seguit de la despesa domèstica. Si s'observa la Figura 4.3 es pot veure la despesa domèstica per a les diferents parròquies.

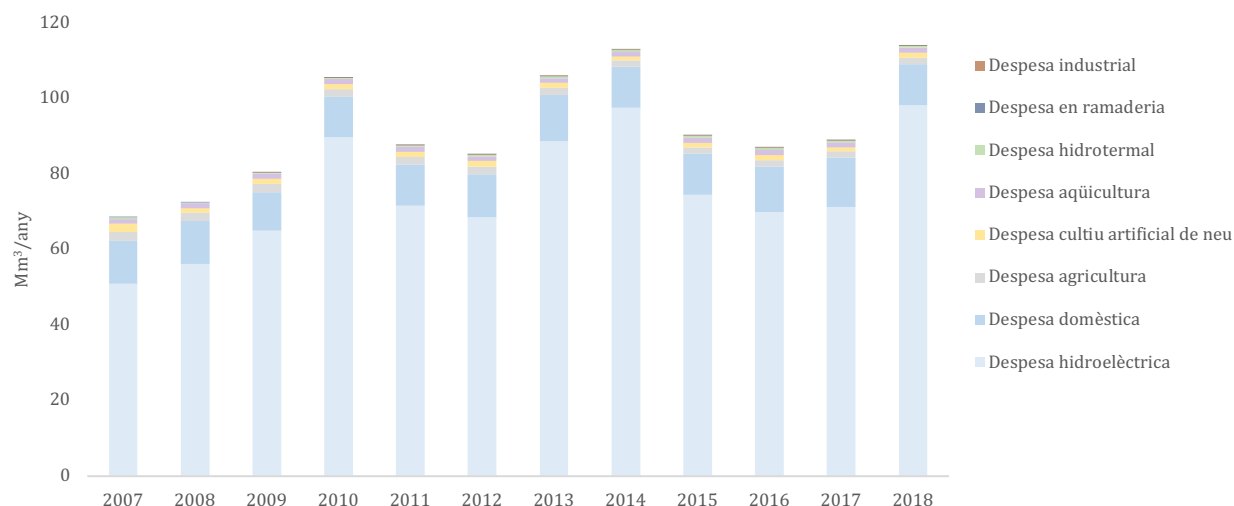


Figura 4.2. Despesa hídrica del Principat d'Andorra. Font: Govern d'Andorra, 2020d

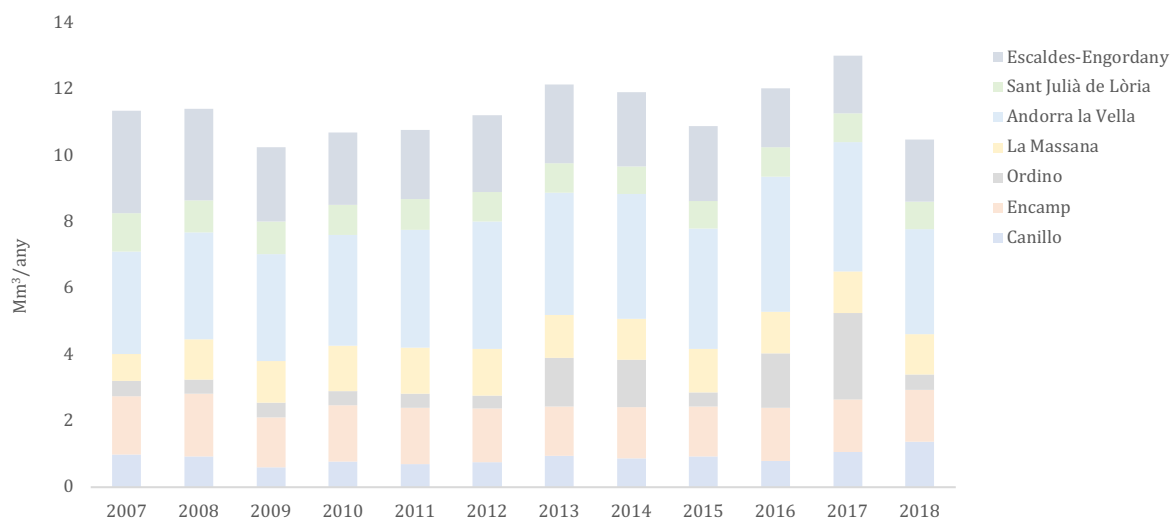


Figura 4.3. Despesa domèstica del Principat d'Andorra. Font: Govern d'Andorra, 2020d

En la figura 4.4 s'observa el recurs disponible del 2012 al 2018 comparat amb les despeses en cada sector. Es pot observar que de moment Andorra disposa de suficient recurs per fer front a la demanda però s'ha de tenir en compte que en determinades situacions, zones i èpoques de l'any pot existir una competència entre els usos i comprometre la disponibilitat d'aquest recurs. Per aquest motiu seria interessant analitzar les dades mensualment i veure en quins períodes pot existir aquesta competència d'usos i crear un estrès hídric. Això amb la finalitat de poder gestionar de forma més eficient aquests possibles conflictes futurs en l'ús de l'aigua mitjançant la modelització amb l'eina WEAP assumint diferents escenaris futurs combinant evolució socioeconòmica de la demanda d'aigua i evolució de la disponibilitat del recurs segons canvis en el clima.



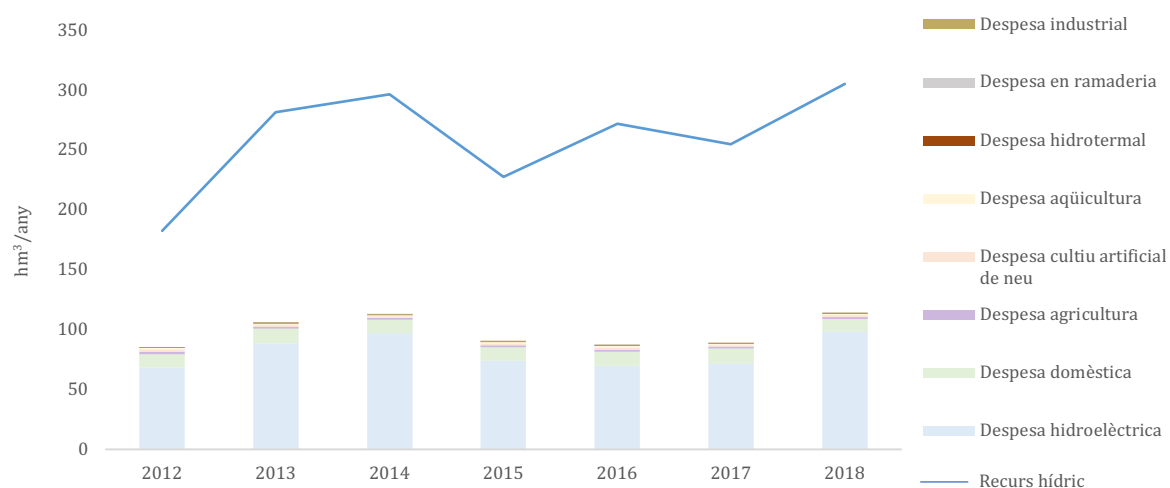


Figura 4.4. Despeses pels diferents sectors del Principat d'Andorra i recurs hídric disponible. Font: Govern d'Andorra, 2020d

#### 4.1.2.2. Caracterització històrica de la demanda d'aigua a Andorra

L'anàlisi de les dades de consum del país dels últims anys que s'obtenen en l'informe del Ministeri de Medi Ambient del Govern d'Andorra (Govern d'Andorra, 2018a) ens permeten observar que el consum es manté més o menys constant amb un augment positiu en els últims anys independentment de l'aigua disponible (Taula 4.1 i Figura 4.5).

	Recurs hídric disponible (menys cabals ecològics)(hm³/any)	Consum (hm³/any)
2010	234,02	105,51
2011	146,75	87,67
2012	182,71	85,18
2013	281,72	105,91
2014	296,88	112,90
2015	228,01	90,15
2016	272,00	86,94
2017	255,00	88,90
2018	305,50	114,00

Taula 4.1. Recurs hídric disponible i consums d'aigua (hm³/anual) d'Andorra pel 2018. Font: Govern d'Andorra, 2018a

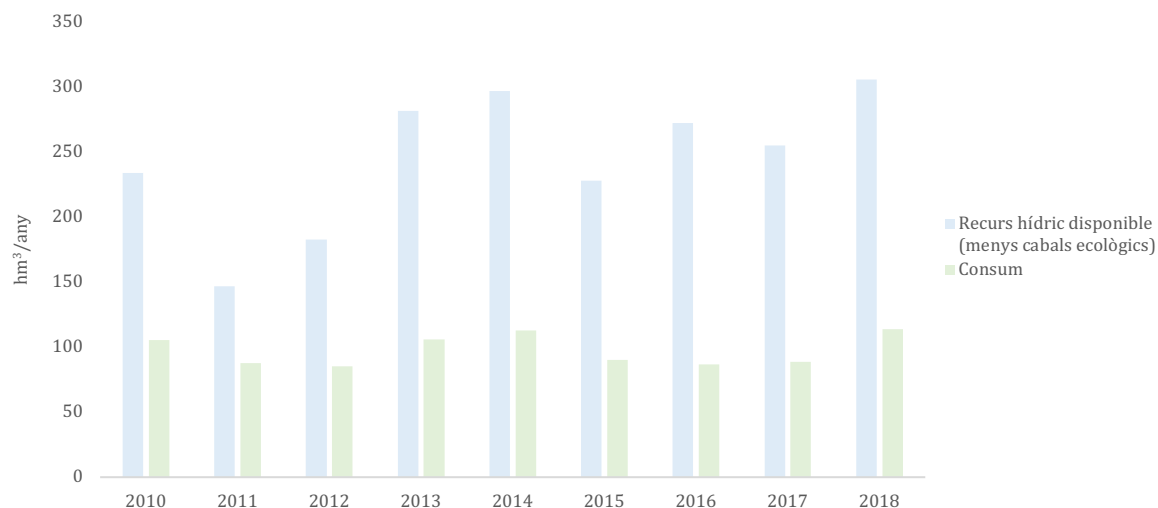


Figura 4.5. Consum i recurs hídric disponible (hm³/any) d'Andorra del 2010 al 2018. Font: Govern d'Andorra, 2018a

Quan es compara el consum d'aigua i el recurs disponible en les diferents èpoques de l'any podem veure que durant l'hivern i l'estiu poden existir conflictes per a l'ús de l'aigua i provocar una pressió sobre el recurs. S'ha de tenir en compte que gran part d'aquest consum d'aigua és no consumptiu, per a la producció d'energia hidroelèctrica i que per tant, l'aigua no és modificada ni en la seva qualitat ni quantitat (Taula 4.2 i Figura 4.6).

	Consum (hm³)	Recurs hídric (hm³)	Ús Consumptiu (hm³)	Ús no consumptiu (hm³)
Anual	114	278	13,2	100,8
Hivern	17,1	18,2	3	14,1
Primavera	49,4	149,4	2,8	46,6
Estiu	24,9	43,2	4,6	20,3
Tardor	22,5	67,5	2,7	19,8

Taula 4.2. Consums d'Andorra pel 2018. Font: Govern d'Andorra, 2018a

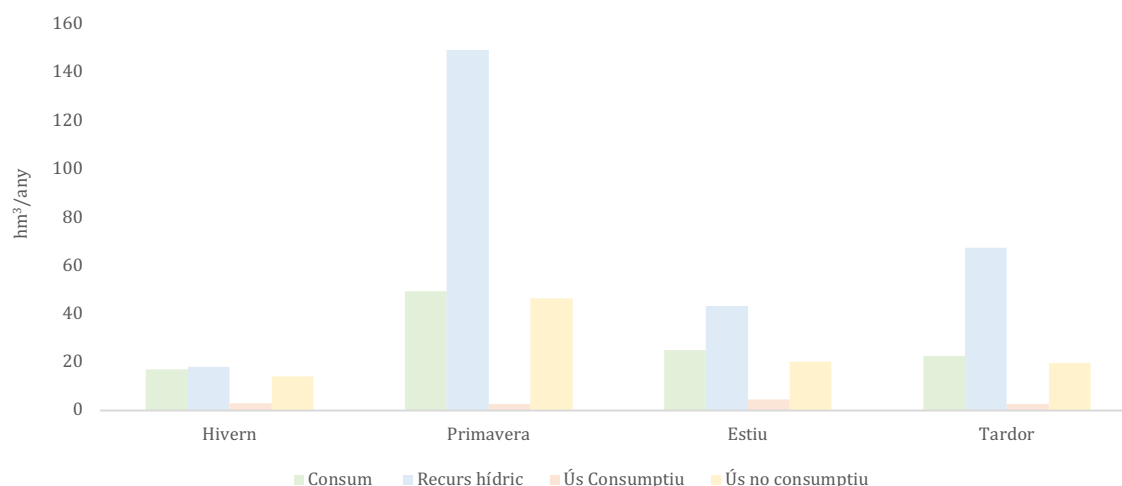


Figura 4.6. Consum d'aigua i recurs hídic disponible segons les estacions de l'any pel 2018 per Andorra. Diferenciació entre consum consumptiu i no consumptiu. Font: Govern d'Andorra, 2018a

#### 4.1.2.2.1. Dades de consum parroquials

La quantitat d'aigua captada varia segons les parròquies. En general, totes les parròquies han augmentat el seu consum domèstic fins el 2013 i es detecta un lleuger descens d'aquest consum a partir d'aquest any amb algunes excepcions (Figura 4.7) (Govern d'Andorra, 2020d).

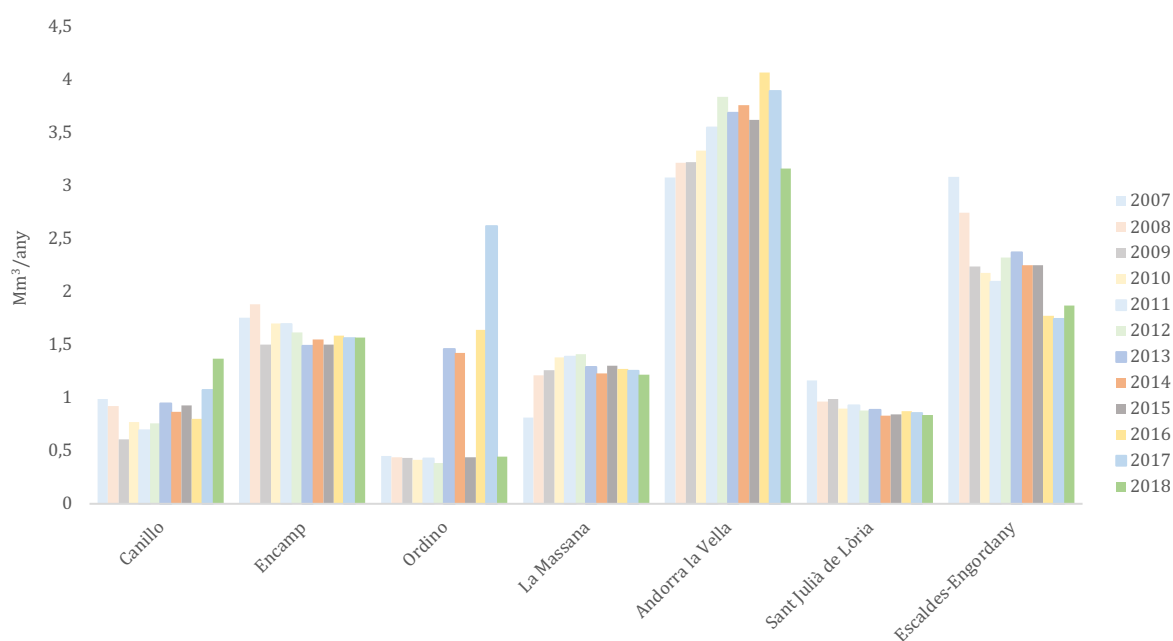


Figura 4.7. Evolució del consum parroquial del 2007 al 2018. Font: Govern d'Andorra, 2020d

Es recullen les dades de consum per les diferents parròquies per l'any 2015 utilitzades per la creació del model WEAP. Aquestes dades han estat recopilades amb l'ajuda del Ministeri de Medi Ambient del Govern d'Andorra i els diferents comuns. Cal destacar que per a la parròquia de Canillo només es disposa de dades del 2014. Cada parròquia recull les dades de forma independent i per tant, cal remarcar que les dades difereixen molt entre elles i no totes diferencien entre els diferents tipus d'usos. Les dades són recollides trimestralment (Taula 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8, 4.9, 4.10).

Trimestres	1r	2n	3r	4rt	Total
Domèstic	54081	26896	23435	20201	<b>124613</b>
Comerç + restaurant	1840	992	1444	888	<b>5164</b>
Hotels	37700	10233	20561	8442	<b>76936</b>
<b>Total</b>	<b>93621</b>	<b>38121</b>	<b>45440</b>	<b>29531</b>	<b>206713</b>

Taula 4.3. Consum d'aigua trimestral a Canillo el 2014 (m<sup>3</sup>). Font: Elaboració pròpia

Trimestres	1r	2n	3r	4rt	Total
Domèstic	158446	136111	139782	132325	<b>566664</b>
Professional	5375	8677	10364	4121	<b>28837</b>
Hotels	19450	10219	15685	10438	<b>55792</b>
<b>Total</b>	<b>183271</b>	<b>155007</b>	<b>165831</b>	<b>147184</b>	<b>651293</b>

Taula 4.4. Consum d'aigua trimestral a Encamp el 2015 (m<sup>3</sup>). Font: Elaboració pròpia

Trimestres	1r	2n	3r	4rt	Total
Domèstic	65058	48121	51071	42330	<b>206580</b>
Professional	3376	2052	2949	2715	<b>11092</b>
Hotels	24440	37293	11448	8485	<b>81666</b>
<b>Total</b>	<b>92874</b>	<b>87466</b>	<b>65468</b>	<b>53530</b>	<b>299338</b>

Taula 4.5. Consum d'aigua trimestral al Pas de la Casa el 2015 (m<sup>3</sup>). Font: Elaboració pròpia

Trimestres	1r	2n	3r	4rt	Total
Domèstic	32558,41	48771,32	41691,09	40110,09	<b>163131,57</b>
Serveis	-	-	-	-	-
Hotels	35713	20722	20014	19120	<b>95569</b>
<b>Total</b>	<b>68271,41</b>	<b>69493,32</b>	<b>61705,09</b>	<b>59230,75</b>	<b>258700,57</b>

Taula 4.6. Consum d'aigua trimestral a Ordino el 2015 (m<sup>3</sup>). Font: Elaboració pròpia

<b>Trimestres</b>	<b>1r</b>	<b>2n</b>	<b>3r</b>	<b>4rt</b>	<b>Total</b>
Domèstic	213413	183363	212625	171203	<b>780604</b>
Professional	-	-	-	-	<b>0</b>
Hotels					<b>0</b>
<b>Total</b>	<b>213413</b>	<b>183363</b>	<b>212625</b>	<b>171203</b>	<b>780604</b>

Taula 4.7. Consum d'aigua trimestral a La Massana el 2015 (m<sup>3</sup>). Font: Elaboració pròpia

<b>-</b>	<b>1r</b>	<b>2n</b>	<b>3r</b>	<b>4rt</b>	<b>Total</b>
Domèstic	270518	291418	287311	284239	<b>1133486</b>
Professional	92130	118619	127252	110966	<b>448967</b>
Hotels	80150	72265	84445	72392	<b>309252</b>
<b>Total</b>	<b>442798</b>	<b>482302</b>	<b>499008</b>	<b>467597</b>	<b>1891705</b>

Taula 4.8. Consum d'aigua trimestral a Andorra la Vella el 2015 (m<sup>3</sup>). Font: Elaboració pròpia

<b>Trimestres</b>	<b>1r</b>	<b>2n</b>	<b>3r</b>	<b>4rt</b>	<b>Total</b>
Domèstic	121799	134380	90652	159239	<b>506070</b>
Professional	-	-	-	-	<b>0</b>
Hotels	-	-	-	-	<b>0</b>
<b>Total</b>	<b>121799</b>	<b>134380</b>	<b>90652</b>	<b>159239</b>	<b>506070</b>

Taula 4.9. Consum d'aigua trimestral a Sant Julià de Lòria el 2015 (m<sup>3</sup>). Font: Elaboració pròpia

<b>Trimestres</b>	<b>1r</b>	<b>2n</b>	<b>3r</b>	<b>4rt</b>	<b>Total</b>
Domèstic	362987	352464	400753	332961	<b>1449165</b>
Professional	124376	96769	126861	85348	<b>433354</b>
Mixta	124118	117256	129146	112438	<b>482958</b>
<b>Total</b>	<b>611481</b>	<b>566489</b>	<b>656760</b>	<b>530747</b>	<b>2365477</b>

Taula 4.10. Consum d'aigua trimestral a Escaldes-Engordany el 2015 (m<sup>3</sup>). Font: Elaboració pròpia

#### 4.1.3. Consum d'aigua en el turisme

Un sector d'especial interès pel cas d'Andorra, degut al seu important pes en el teixit socioeconòmic, és el consum d'aigua derivat del sector del turisme. Tot i que l'ús de l'aigua en el sector del turisme és típicament menys de l'1 % de l'aigua nacional utilitzada (Gössling et al., 2012), la situació pot ser diferent a nivell regional, en particular on l'aigua pot ser escassa i el nombre de turistes és substancial. Un exemple podria ser el cas d'Andorra on el pes del turisme és elevat i segurament el consum d'aigua seria bastant més elevat de l'1 % en determinades èpoques de l'any. A Andorra no es disposa de dades detallades de quin percentatge d'aigua consumida correspon a l'ús turístic. Si que se sap que un 2 % de la despesa hídrica correspon a les pistes d'esquí

(Figura 4.8.) el 2016 i un 1 % el 2018 (Govern d'Andorra, 2016, 2018a) però faltaria saber l'aigua consumida pels hotels i per tant, el consum d'aigua pel turisme seria més elevat que l'1 %. Actualment aquesta dada és difícil d'obtenir vist que és considerada com a despesa hídrica domèstica i no està diferenciada.



Figura 4.8. Fotografies de les pistes d'esquí i dels canons de neu. Font: OBSA

En el futur, el turisme a moltes regions s'enfrontarà considerablement a majors problemes respecte a la disponibilitat i la qualitat d'aigua a causa de l'increment en l'ús de l'aigua i el canvi climàtic, per tant, és important conèixer quin pes implica el turisme en el consum d'aigua.

El turisme depèn en un grau considerable de l'aigua, que és tant un recurs necessari per proporcionar serveis relacionats amb les necessitats bàsiques de l'humà, com la higiene o l'alimentació, així com una condició prèvia per a la producció de combustible, i un element essencial per a una àmplia gamma d'activitats pels turistes, piscines, el golf i els esports d'hivern (Gössling et al., 2012).

D'altra banda, l'aigua és un element central present en els paisatges i que es presenta de diverses formes, des del reg de jardins dels hotels, la neu a l'hivern, els llacs i rierols integrats en els parcs. Per tant, la disponibilitat limitada d'aigua, la mala qualitat o una crisi d'aigua pot tenir conseqüències i donar una mala imatge de les destinacions turístiques (Hall, 2010; Hall i Stoffels, 2006).

L'estudi de Gössling et al. (2012) suggereix que l'ús directe d'aigua en el turisme és d'entre 80 a 2000 litres per turista i dia, amb una tendència que en els grans hotels aquest consum és més elevat en comparació als petits establiments menys luxosos. Segons la ubicació geogràfica i les condicions ambientals i/o climàtiques, els factors que consumeixen més aigua són els jardins de regadiu, les piscines, les instal·lacions de spa i benestar, així com camps de golf, torres de refrigeració (quan es fan servir), habitacions i cuines.

El turisme de massa està associat a un ús insostenible dels recursos naturals i un ús intensiu del sòl i s'identifica amb freqüència com un dels principals estressors ambientals a les regions costaneres. L'estudi de Gabarda-Mallorquí, Garcia i Ribas (2017) estudia les principals variables identificades com a determinants del consum d'aigua dels hotels influeixen l'eficiència de l'aigua en hotels de Lloret de Mar (Costa Brava, Espanya) i els resultats d'una modelització mostren que els hotels grans que atrauen milers de turistes anualment també es beneficien d'economies d'escala en termes d'eficiència hídrica.

L'estudi de Torres-Bagur, Palom i Vila-Subirós (2019) identifica els principals problemes associats al canvi climàtic per tal de dissenyar estratègies eficaces de mitigació i adaptació per garantir la sostenibilitat del turisme i dels recursos naturals.

Es aquest estudi es van realitzar una sèrie d'entrevistes a 31 hotels, càmpings i allotjaments rurals de la conca del riu Muga, al nord-est de Catalunya, en què es va preguntar a propietaris i administradors sobre les seves percepcions sobre el canvi climàtic, els efectes i les contramesures. Els resultats van mostrar que les percepcions sobre el canvi climàtic i els seus efectes varien segons el tipus d'establiment i ubicació (costa, ciutats o a l'interior). Es van observar diferències significatives en les percepcions de com les responsabilitats d'implementar mesures de mitigació i adaptació per combatre els efectes del canvi climàtic, inclosa l'escassetat d'aigua, s'haurien de repartir entre els principals agents amb interès a garantir la sostenibilitat del turisme, és a dir, els organismes governamentals, establiments i clients turístics i l'opinió predominant, era que la major part de la responsabilitat hauria de recaure en els òrgans governamentals. Per tant, només quan els responsables de la gestió d'establiments turístics siguin conscients dels riscos del canvi climàtic, serà possible dissenyar i

implementar estratègies efectives a curt, mitjà i llarg termini destinades a enfortir la resiliència de la indústria turística.

L'estudi de Rico, Olcina, Baños, Garcia i Sauri (2020) afirma que el consum d'aigua pot disminuir als centres turístics i a les ciutats del Mediterrani occidental. Mostren la disminució del consum d'aigua a l'estació de turisme massiu de Benidorm (Espanya), entre el 2005 i el 2014 i calculen la influència de factors com la mida i la categoria de l'hotel en la reducció de l'ús de l'aigua i intenta discernir fins a quin punt aquesta disminució reflecteix les accions de conservació conscients realitzades per la indústria hotelera. Aquestes reduccions en el consum d'aigua semblaven estar relacionades amb la categoria d'hotels; els hotels de 3 estrelles (els més habituals a Benidorm) observen les disminucions més grans i els hotels de quatre i cinc estrelles experimenten la tendència contrària. Observen la tensió entre els esforços i la conservació de l'aigua i l'expansió contínua dels serveis relacionats amb l'aigua. Això pot ajudar a explicar per què, malgrat l'aplicació d'esforços de conservació, el consum no disminueix en totes les categories d'hotels, tot i que disminueix per a Benidorm en el seu conjunt.

L'estudi de Hof i Blazquez-Salom (2015) presenta una investigació interdisciplinària basada en una anàlisi comparativa i aprofundida del consum d'aigua i els patrons d'ús del sòl en diverses formes de turisme urbà a Mallorca. Estudia el canvi de patrons turístics cap a un turisme residencial i de qualitat, sobre la base que la inversió de capital i els guanys creixents són els seus principals motors. La consciència social sobre la massificació i les limitacions de recursos ha traslladat el marc de planificació reguladora cap a permetre una expansió urbana addicional, basada en la coartada d'un turisme de qualitat. La retòrica d'aquest marc representa una primera solució de sostenibilitat, una solució que amaga la major demanda d'aigua i els problemes de canvi climàtic. Aquest tipus de turisme ha donat lloc a un paisatge urbà socioespacial desigual de consum d'aigua. Aquest paisatge turístic urbà és vulnerable als canvis climàtics, ja que es sosté amb un ús excessiu de l'aigua. El subministrament d'aigua és una greu limitació que s'ha resolt mitjançant la seva mercantilització i privatització del subministrament, considerada una segona solució de sostenibilitat. Aquest procés de desenvolupament turístic empitjora, donant lloc a la segona contradicció de



l'acumulació de capital entre l'imperatiu del creixement continu i els recursos naturals finits.

D'altra banda, el turisme de muntanya es basa principalment en dos recursos territorials específics, el paisatge (Reichler, 2002) i la neu (Gumuchian, 1983). Als Alps i als Pirineus, el desenvolupament d'estacions d'esports d'hivern ha tingut l'efecte beneficiós de frenar parcialment l'èxode rural i de mantenir llocs de treball en aquestes zones. Tanmateix, el turisme d'hivern ha comportat una dependència econòmica molt forta d'aquest sector d'activitat.

En el cas d'Andorra gran part del turisme es concentra a l'hivern en els dominis esquiables i en els últims anys també s'està començant a desenvolupar el turisme de muntanya amb diferents activitats durant l'estiu, per tant, és important analitzar aquest pes del turisme en aquestes zones de muntanya (Figura 4.9).



Figura 4.9. Fotografia d'Andorra la Vella. Font: OBSA

Les condicions naturals particulars de les zones de muntanya com l'augment de les precipitacions amb l'altitud, l'efecte barrera, els pendents abruptes, la coberta vegetal reduïda, tant per raons naturals com antropogèniques, i de vegades, el context geològic particular de sectors propicis per a les esllavissades i les inundacions torrencials constitueixen un repte important per al desenvolupament i el manteniment de les

infraestructures, en particular les vies de comunicació. Cal tenir en compte també que les transformacions actuals sota l'efecte del canvi climàtic constitueixen limitacions importants per a l'ús del sòl i el desenvolupament econòmic. Aquestes transformacions poden ser vistes com a oportunitats per a determinades activitats econòmiques com és el cas de la producció d'energia hidroelèctrica, que ha aprofitat les característiques naturals (riquesa d'aigua en altitud, emmagatzematge d'aquesta aigua en forma de neu i gel, pendents escarpats) per tal d'explotar intensivament el recurs hídic (Reynard, 2020).

La neu i l'aigua constitueixen tant limitacions com oportunitats per al turisme de muntanya. Des de finals dels anys vuitanta, l'augment de les temperatures i la variabilitat interanual de la precipitació hivernal han alterat aquesta activitat turística i les localitats s'han hagut d'adaptar, primer desenvolupant instal·lacions per a la producció de neu artificial (Scott, 2006) i cada cop més a la recerca d'alternatives a l'esquí i als esports de neu.

Les relacions entre la disponibilitat del recurs hídic i el turisme han estat objecte de diversos estudis (Gössling, Hall i Scott, 2015; Gössling et al., 2012), especialment quan una gran activitat turística es superposa a la disponibilitat feble del recurs hídic. D'altra banda, cal tenir en compte l'elevada variabilitat estacional de la freqüentació en aquestes zones, on els pics de la demanda d'aigua sovint coincideixen amb nivells d'aigua baixos (Vanham, Fleischhacker i Rauch, 2008) i la problemàtica central és la gestió dels pics de demanda i l'emmagatzematge de l'aigua. És el cas de les zones de muntanya durant la temporada d'hivern, un problema que s'agreuja per les demandes d'aigua específiques per a l'activitat turística (Reynard, 2020).

Diversos estudis han destacat en determinats dominis esquiables la forta reducció, actual i futura de la fiabilitat del mantell de neu natural (Vanham, Fleischhacker i Rauch, 2009) i la contribució substancial de la producció de neu artificial (Scott, Gössling i Hall, 2012) que demostren que aquesta última és una estratègia efectiva d'adaptació al canvi climàtic en les estacions turístiques de muntanya i l'impacte és força reduït en el balanç hídic regional de demanda d'aigua per a la neu artificial (Reynard i Bonriposi, 2012; Reynard et al., 2014).

L'estudi de l'impacte del canvi climàtic en la gestió de l'aigua de muntanya no es pot limitar a anàlisis aproximades de l'evolució de determinats paràmetres climàtics (precipitació, neu). Els estudis han d'analitzar en detall (a escala espacial i temporal) tant el recurs com la demanda d'aigua, les seves interrelacions i els sistemes socioeconòmics que els gestionen, així com les característiques territorials específiques que els afecten (Reynard, 2020).

Destacar que en les últimes dècades, tots els dominis esquiables han optat per la instal·lació d'equips de producció de neu artificial malgrat els elevats costos econòmics, energètics i ambientals. Fins al moment, la producció de neu artificial ha ajudat generalment a garantir la viabilitat de les estacions d'esquí limitant els efectes negatius dels hiverns on la neu és escassa. No obstant això, la seva efectivitat es podria reduir considerablement en cas de temperatures mitjanes més elevades, com les previstes pels Pirineus en les pròximes dècades. Per tant, les estacions d'esquí hauran d'adaptar-se i aquesta adaptació implicarà necessàriament l'evolució de les estacions cap a activitats que no depenen només de la neu. L'esquí sempre serà una opció, si les condicions meteorològiques ho permeten, però probablement no serà suficient per assegurar la viabilitat econòmica d'aquestes estacions considerades fonamentals per a la supervivència socioeconòmica de les regions de muntanya (Sauri i Llurdés, 2020).

Els escenaris d'elevades emissions on es preveu un augment de la temperatura per sobre dels 2 °C podria comportar pèrdues de fins al 73 % per al sector de l'esquí a mitjans de segle (Scott, Steiger, Rutty, Pons i Johnson, 2019). Tenint en compte les incerteses sobre la sostenibilitat de la coberta de neu s'han de començar a explorar noves estratègies d'adaptació (la producció de neu artificial, la transició dels dominis esquiables a zones de muntanya amb l'oferta d'altres activitats).

El Programa de Medi Ambient de les Nacions Unides (PNUMA), igual que qualsevol sector de la producció, diu que el turisme té impactes negatius i efectes positius per al medi ambient, la societat i l'economia a nivell local, nacional i mundial. Entre els diferents impactes ambientals del turisme, els efectes sobre els recursos d'aigua són un dels impactes més rellevants. La demanda d'aigua del turisme pot generar greus problemes de sobreexplotació o d'esgotament en llocs on els recursos d'aigua són

escassos. Diversos estudis demostren que la viabilitat i sostenibilitat de qualsevol destinació turística depèn en última instància d'un subministrament adequat d'aigua tant en quantitat com en qualitat. Per tant, el turisme serà un dels sectors clau en els que s'analitzarà com afectarà la seva evolució tant en la disponibilitat de recurs com en la demanda.

#### 4.2. Punts clau del capítol

- El consum estimat per habitant a Andorra es considera de 220 l/hab/dia.
- La despesa d'aigua total el 2018 és de 114 hm<sup>3</sup>/anuals (on 13,2 hm<sup>3</sup>/anuals corresponen a la despesa domèstica, industrial, agrícola i ramadera i 100,9 hm<sup>3</sup>/anuals a la despesa hidroelèctrica, aqüicultura i fabricació de neu artificial).
- Els principals consumidors d'aigua són el sector de la hidroelèctrica (86 %) seguit del sector domèstic (10 %), l'agricultura (2 %) i la producció de neu (1 %).
- El consum d'aigua per a tots els usos presenta poques variacions anuals (2010-2018) amb valors entre 80 i 115 hm<sup>3</sup>/anuals independentment de la disponibilitat d'aigua.
- El turisme juga un paper clau en la demanda i disponibilitat del recurs hídric degut el pes que té en l'economia andorrana, principalment el vinculat al turisme d'esquí.

#### 4.3. Referències

- Alcamo, J., Flörke, M., & Märker, M. (2007). Future long-term changes in global water resources driven by socio-economic and climatic changes. *Hydrological Sciences Journal*, 52(2), 247-275.
- Arbués, F, Barberán, R., & Villanúa, I. (2000). Water price impact on residential water demand in the city of Zaragoza: A dynamic panel data approach. In *40th European Congress of the European Regional Studies Association (ERSA) in Barcelona, Spain* (Vol. 24, pp. 30-31).
- Arbués, Fernando, García-Valiñas, M. Á., & Martínez-Espiñeira, R. (2003). Estimation of residential water demand: A state-of-the-art review. *Journal of Socio-Economics*, 32(1), 81-102. [https://doi.org/10.1016/S1053-5357\(03\)00005-2](https://doi.org/10.1016/S1053-5357(03)00005-2)
- Consell General Andorra la Vella. (1985). Llei de policia i protecció de les aigües. *Bopa*,

140–144.

Gabarda-Mallorquí, A., Garcia, X., & Ribas, A. (2017). Mass tourism and water efficiency in the hotel industry: A case study. *International Journal of Hospitality Management*, 61, 82–93.

Galbiati, L. (2015). *La Directiva marc de l' aigua i el canvi climàtic* (Vol. Capítol 26).

García-Valiñas, M. A., Martínez-Espiñeira, R., & González-Gómez, F. (2010). Affordability of residential water tariffs: Alternative measurement and explanatory factors in southern Spain. *Journal of Environmental Management*, 91(12), 2696–2706.  
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.07.029>

Gössling, S., Hall, C. M., & Scott, D. (2015). *Tourism and water* (Vol. 2). Channel View Publications.

Gössling, S., Peeters, P., Hall, C. M., Ceron, J. P., Dubois, G., Lehmann, L. V., & Scott, D. (2012). Tourism and water use: Supply, demand, and security. An international review. *Tourism Management*, 33(1), 1–15.  
<https://doi.org/10.1016/j.tourman.2011.03.015>

Govern d'Andorra. (1996). Butlletí Oficial del Principat d'Andorra de control de les aigües residuals i de protecció de les aigües superficials. BOPA, 1822–1836.  
<https://www.bopa.ad/bopa/008083/Pagines/44FE.aspx>

Govern d'Andorra (2007). Estudi de les aigües subterrànies del Principat d'Andorra.  
<https://www.mediambient.ad/images/stories/PDF/aigua/Memoria.pdf>

Govern d'Andorra. (2016). Quantificació de la despesa Hídrica per usos del Principat d'Andorra. Govern d'Andorra.  
<https://www.mediambient.ad/images/stories/PDF/aigua/Despesa-hidrica-Any-2016.pdf>

Govern d'Andorra. (2018a). Estudi per a l'elaboració anual de l'inventari i quantificació de la despesa hídrica per usos del Principat d'Andorra.  
<https://www.mediambient.ad/images/stories/PDF/aigua/Despesa-hidrica-Any-2018.pdf>

Govern d'Andorra. (2018b). Estudi per a l'elaboració anual del balanç hídric del Principat d'Andorra. <https://www.mediambient.ad/el-recurs>

Govern d'Andorra. (2020b). Les aigües subterrànies.  
<https://www.mediambient.ad/aigues-subterrànies>

Govern d'Andorra. (2020a). Les aigües superficials. <https://www.mediambient.ad/les->

## aigues-superficials

- Govern d'Andorra. (2020d). Ministeri de Medi Ambient i Sostenibilitat. Aigua - La despesa hídrica. <https://www.mediambient.ad/la-despesa-hidrica>
- Govern d'Andorra. (2020c). Plà de sanejament de les aigües. <https://www.mediambient.ad/pla-de-sanejament-aigues>
- Gumuchian, H. (1983). *La neige dans les Alpes françaises du Nord: une saison oubliée, l'hiver*. Editions des Cahiers de l'Alpe.
- Hall, C. M. (2010). Crisis events in tourism: subjects of crisis in tourism. *Current Issues in Tourism*, 13(5), 401–417.
- Hall, C. M., & Stoffels, M. (2006). Lake tourism in New Zealand: sustainable management issues. *Lake Tourism: An Integrated Approach to Lacustrine Tourism Systems*, 182e206.
- Herrington, P., Newborne, P., & Saade-Hazin, L. (2003). *Social issues in the provision and pricing of water services*. Paris: OECD.
- Hof, A., & Blazquez-Salom, M. (2015). Changing tourism patterns, capital accumulation, and urban water consumption in Mallorca, Spain: a sustainability fix? *Journal of Sustainable Tourism*, 23(5), 770–796.
- OCDE. (2010). *Pricing water resources and water and sanitation services*. Organisation for Economic Co-operation and Development.
- Reichler, C. (2002). *La découverte des Alpes et la question du paysage*. Georg.
- Reynard, E., & Bonriposi, M. (2012). Water use management in dry mountains of Switzerland. The case of Crans-Montana-Sierre area. In *The impact of urbanisation, industrial, agricultural and forest technologies on the natural environment* (pp. 281–301). Nyugat-magyarországi Egyetem.
- Reynard, E., (2020). Tourisme de montagne et gestion de l'eau et de la neige en contexte de changement climatique. *Revue de Géographie Alpine*, (108–1), 0–8. <https://doi.org/10.4000/rga.6814>
- Reynard, E., Bonriposi, M., Graefe, O., Homewood, C., Huss, M., Kauzlaric, M., Liniger, H., Rey, E., Rist, S., Schädler, B., Schneider, F. & Weingartner, R.. (2014). Interdisciplinary assessment of complex regional water systems and their future evolution: how socioeconomic drivers can matter more than climate. *WIREs Water*, 1(4), 413–426. <https://doi.org/10.1002/wat2.1032>
- Reynaud, A. (2008). France. In *Social Policies and Private Sector Participation in Water*

*Supply* (pp. 37–69). Springer.

- Reynaud, A., Pons, M., & Pesado, C. (2018). Household Water Demand in Andorra: Impact of Individual Metering and Seasonality. *Water*, 10(3), 321. <https://doi.org/10.3390/w10030321>
- Rico, A., Olcina, J., Baños, C., Garcia, X., & Sauri, D. (2020). Declining water consumption in the hotel industry of mass tourism resorts: Contrasting evidence for Benidorm, Spain. *Current Issues in Tourism*, 23(6), 770–783.
- Sauri, D., & Llurdés, J. C. (2020). Changement climatiques et stratégies d'adaptation dans les stations de ski catalanes espagnoles. *Revue de Géographie Alpine*, (108–1), 0–16. <https://doi.org/10.4000/rga.6782>
- Scott, D. (2006). Global environmental change and mountain tourism. *Tourism and Global Environmental Change*, 54–75.
- Scott, D., Gössling, S., & Hall, C. M. (2012). International tourism and climate change. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 3(3), 213–232.
- Scott, D., Steiger, R., Rutty, M., Pons, M., & Johnson, P. (2019). The differential futures of ski tourism in Ontario (Canada) under climate change: the limits of snowmaking adaptation. *Current Issues in Tourism*, 22(11), 1327–1342.
- Torres-Bagur, M., Palom, A. R., & Vila-Subirós, J. (2019). Perceptions of climate change and water availability in the Mediterranean tourist sector: A case study of the Muga River basin (Girona, Spain). *International Journal of Climate Change Strategies and Management*.
- Vanham, D, Fleischhacker, E., & Rauch, W. (2008). Seasonality in alpine water resources management? a regional assessment.
- Vanham, Davy, Fleischhacker, E., & Rauch, W. (2009). Impact of snowmaking on alpine water resources management under present and climate change conditions. *Water Science and Technology*, 59(9), 1793–1801.



# CAPÍTOL

# 5

## 5. MODELITZACIÓ INTEGRAL DEL RECURS HÍDRIC

- 5.1. Gestió integrada dels recursos hídrics
- 5.2. Models d'Avaluació Integrada
- 5.3. Models d'avaluació integral del recurs hídric
- 5.4. Modelització integral del cicle de l'aigua amb WEAP
- 5.5. Model WEAP-Andorra
  - 5.5.1. Definició de l'àrea d'estudi
  - 5.5.2. Anàlisi hidrològic
  - 5.5.3. Demanda d'aigua
  - 5.5.4. Calibració i validació del model
  - 5.5.5. Creació d'escenaris
  - 5.5.6. Resultats del model WEAP-Andorra
- 5.6. Punts clau del capítol
- 5.7. Referències



## 5. MODELITZACIÓ INTEGRAL DEL RECURS HÍDRIC

---

### 5.1. Gestió integrada del recurs hídric

En diferents països del món es produeixen tensions per la manca d'aigua potable i d'un sanejament bàsic del recurs, la pressió de sectors econòmics com l'energia o l'agricultura o els conflictes i les crisis transfrontereres. Aquestes pressions i tensions han de proporcionar incentius als governs per iniciar processos que permetin millorar la gestió del recurs hídric. Un mecanisme per conèixer millor aquestes problemàtiques i buscar i implementar solucions és la Gestió Integrada del Recurs Hídric (IWRM, de les sigles en anglès Integrated Water Ressources Management). Pel cas d'Andorra, a dia d'avui, es disposa d'un recurs hídric de qualitat i en quantitat. No obstant, el canvi global, especialment els canvis futurs en el recurs provocats pel canvi climàtic o el canvis en la demanda degut a l'activitat econòmica podrien intensificar les pressions provocades en certs moments concrets de l'any i entrar en conflicte entre els diferents usos creant situacions puntuals d'estrès hídric. Per aquest motiu, és cabdal conèixer de forma integrada la interacció entre el recurs hídric disponible i els usos de l'aigua i les demandes i poder arribar a gestionar de forma integrada i sostenible aquest recurs.

La Gestió Integrada del Recurs Hídric es pot definir com un procés que promou el desenvolupament i la gestió coordinada de l'aigua, el sòl i els recursos relacionats amb l'objectiu de maximitzar el benestar econòmic i social d'una manera equitativa sense comprometre la sostenibilitat dels ecosistemes (Jonch-Clausen, 2004). Es tracta d'un enfocament integral per al desenvolupament i la gestió de l'aigua, abordant la seva gestió tant com a recurs com en el marc per a la prestació dels serveis de l'aigua.

Aquesta gestió integrada del recurs variarà en funció del país i s'implementarà de manera diferent segons les característiques pròpies del país. Per exemple, en alguns països s'ha optat per dissenyar una gestió pròpia, com en el cas de la Directiva marc de l'aigua de la UE.

Els tres pilars de la Gestió Integrada del Recurs Hídric són (Figura 5.1.):

- 1) avançar cap a un entorn propici de polítiques, estratègies i legislació adequades per al desenvolupament i la gestió sostenibles del recurs hídric

- 2) establir el marc institucional mitjançant el qual es poden implementar les polítiques, les estratègies i la legislació
- 3) establir els instruments de gestió requerits per aquestes institucions

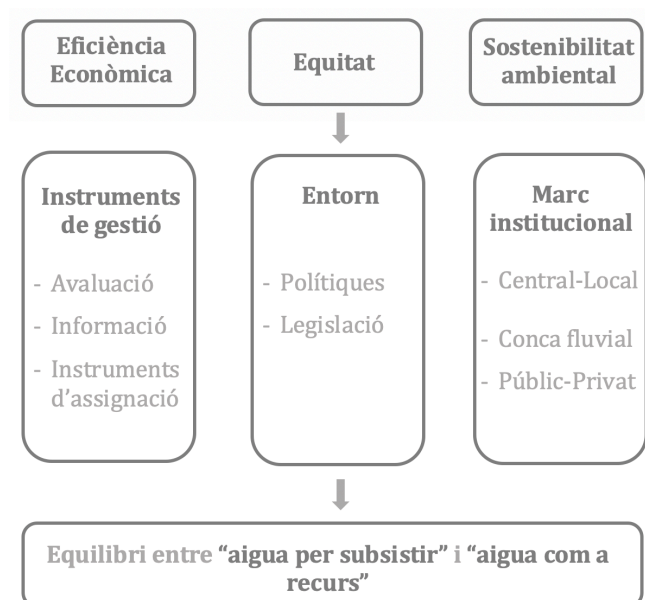


Figura 5.1. Els tres pilars de la gestió integral de l'aigua. Font: Jonch-Clausen, 2004

Els governs tenen un paper clau en la implementació d'un marc de gestió de serveis i han de ser els principals reguladors i controladors del sector de l'aigua i les seves infraestructures associades. Però "l'aigua és un bé de tots els ciutadans" i els governs han de treballar conjuntament amb la societat civil per conscienciar sobre la importància de millorar la gestió del recurs hídric.

Un element important de la Gestió Integrada del Recurs Hídric és la integració de diverses visions i interessos sectorials que hauria de tenir lloc dins:

- el sistema natural, amb la seva importància crítica per a la disponibilitat de recursos i la qualitat com la integració de la gestió dels sòls i l'aigua, les aigües superficials i subterrànies i tenir en compte el cicle hidrològic complet.
- el sistema humà, que es refereix a la integració intersectorial de polítiques i estratègies de tots els grups d'interès en els processos de decisió.

## 5.2. Models d'Avaluació Integrada

Fins fa poc els sistemes i models es centraven únicament en la avaluació de la dimensió física del canvi climàtic però cada cop es té més en compte el sistema en el seu conjunt per apropar-se més a la realitat. Per tant, s'ha de considerar el sistema de forma integrada tenint en compte tant els canvis ambientals com els canvis socioeconòmics.

La visió integral estudia les interrelacions entre tots els components del sistema amb l'objectiu de poder establir polítiques de gestió del recurs més adients. Tot i així, el sistema es complex i cal analitzar els diferents elements que el constitueixen. En aquest sentit, molts investigadors combinen l'aspecte científic i econòmic per avaluar la gestió i les polítiques del canvi climàtic utilitzant els Models d'Avaluació Integrada (IAM de les sigles en anglès Integrated Avaluation Models) (Schwanitz, 2013).

Els IAM es poden dividir en dues grans categories, els models d'optimització de polítiques i els models d'avaluació de polítiques (Weyant, 1995).

Els models d'optimització de polítiques optimitzen variables de control de polítiques clau, com ara taxes de control d'emissions de carboni o impostos al carboni, donats uns objectius de polítiques com poden ser maximitzar el benestar o minimitzar els costos per aconseguir una emissió de carboni o un objectiu de concentració d'emissions. Es poden dividir en tres tipus principals:

- 1) Models de cost-benefici, que intenten equilibrar els costos i els beneficis de les polítiques climàtiques
- 2) Models basats en objectius, que optimitzen les respostes donats uns objectius relacionats amb les emissions o els impactes del canvi climàtic
- 3) Models basats en la incertesa, que aborden la presa de decisions en condicions d'incertesa

D'altra banda, els models d'avaluació de polítiques, projecten les conseqüències físiques, ecològiques, econòmiques i socials de les polítiques específiques. Són de dos tipus:

- 1) Models de projecció determinats, en què cada entrada i sortida pren un valor únic

- 2) Models de projecció estocàstica, en els quals almenys algunes entrades i sortides són tractades aleatoriament. En mateixes condicions inicials poden conduir a resultats diferents

Existeixen una sèrie de components altament incerts en el conjunt actual d'avaluacions integrades, com ara la sensibilitat del sistema climàtic als canvis en les concentracions de gasos d'efecte hivernacle, els impactes físics i econòmics de qualsevol canvi climàtic que es pugui produir i l'aplicabilitat i elecció de les polítiques. Tot i que és difícil triar amb confiança una política en preferència a d'altres basada en el coneixement actual sobre el sistema climàtic i les interaccions humanes amb aquest sistema, s'ha demostrat que l'objectiu de la política, la taxa i el temps de compliment poden ser crítics a la formulació de polítiques a curt termini i el cost global de l'acció (Weyant, 1995).

### **5.3. Models d'avaluació integral del recurs hídric**

L'objectiu dels models de Gestió Integrada del Recurs Hídric és preparar un pla de subministrament d'aigua que tingui en compte les necessitats dels diferents usuaris d'una conca. Aquests models han d'abordar els dos sistemes diferents que configuren la gestió de l'aigua, concretament el biofísic (el clima, la topografia, la coberta vegetal, la hidrologia de les aigües superficials, la hidrologia de les aigües subterrànies, els sòls, la qualitat de l'aigua i els ecosistemes que configuren la disponibilitat d'aigua i el seu moviment a través d'una divisòria hidrogràfica) i el socioeconòmic (demanda d'aigua, l'emmagatzematge de l'aigua disponible i el subministrament) (Yates, Sieber, Purkey, i Huber-Lee, 2005).

A més, un model de gestió de l'aigua és útil per considerar els impactes de diferents escenaris futurs (canvis en la hidrologia, en les decisions de gestió, canvis socioeconòmics, etc.) en tot el sistema i valorar les mesures de mitigació proposades (canvis en el subministrament d'aigua a un sector determinat, canvis en les prioritats del sector o transferències massives d'aigua dins i fora d'una conca). Per tant, els models cada vegada es converteixen en eines indispensables per a la planificació, el disseny i la gestió de les infraestructures relacionades hidrològicament.

Aquests models que proporcionen informació i coneixement per poder ajudar a millorar els processos de gestió i planificació del sistema hídric sovint, són el nucli de sistemes complexos de suport a les decisions (DSS, de les sigles en anglès Decision Support System). Els DSS poden ajudar en diferents nivells de detall, que van des de models de cribratge simples per guiar activitats de recollida de dades fins a eines més complexes que requereixen alts nivells d'expertesa (Assaf, Van Beek, Borden, Gijsbers, Jolma, Kaden, Kaltofen, Labadie, Loucks i Quinn, 2008). Tots els models produeixen representacions simplificades dels sistemes reals i han estat implementats a tot el món (Sulis i Sechi, 2013).

Si bé cada model té les seves pròpies característiques especials, tots estan dissenyats per facilitar l'entrada, emmagatzematge, recuperació i visualització de dades associades als models de simulació de conques hidrogràfiques. El més important és que proporcionen una forma d'implicar les parts interessades a aconseguir una visió compartida del funcionament dels sistemes de recurs hídric i els possibles impactes econòmics, ambientals, hidrològics i/o ecològics de les polítiques de desenvolupament i de gestió alternatives (Loucks, 2006).

Els diferents sistemes genèrics de suport a la decisió varien sovint en el detall de les anàlisis que poden realitzar. Un dels reptes del desenvolupament d'aquestes eines és intentar satisfer les necessitats dels diferents nivells de presa de decisions. L'ideal és que qualsevol sistema de suport a la decisió hauria de ser capaç de:

- ajudar els grups d'interès a construir els seus propis models i a identificar els problemes importants en la gestió de determinades conques hidrogràfiques
- proporcionar una comprensió prèvia de les interrelacions o interdependències entre diferents components del sistema
- proporcionar una primera estimació de la importància relativa de diversos supòsits sobre dades i valors de paràmetres incerts respecte als valors de diversos criteris de rendiment del sistema
- facilitar la comunicació i la comprensió entre totes les parts interessades, ajudant-los a arribar a una visió compartida, una comprensió comuna de com funciona la conca hidrogràfica i com es pot gestionar en el futur.

La base de cada model de simulació es troba sota el balanç de l'aigua. Cada model proporciona una manera de fer un seguiment des d'on es troba l'aigua, cap a on va i possiblement del que hi ha, és a dir, la seva qualitat. Mitjançant diverses simulacions, els individus poden provar, modificar i avaluar diversos dissenys estructurals i polítiques de funcionament de manera sistemàtica de les que jutgen millor. També poden determinar on poden ser beneficioses dades i anàlisis més detallades i potencialment més precises (Loucks, 2006).

Els resultats de qualsevol simulació informàtica sempre depenen molt dels supòsits incorporats a la simulació. Aquests supòsits normalment inclouen usos futurs del sòl en la conca, quantitats i pautes futures de precipitació en l'espai i el temps, taxes de consum i demanda futura dels usuaris, canvis en dissenys i funcionament de les instal·lacions i nombrosos valors de paràmetres de funcions que defineixen el funcionament del sistema, per exemple, la producció d'energia hidroelèctrica, el flux d'aigua subterrània i el transport de contaminants. Cal indicar que sovint no és possible conèixer tots aquests supòsits amb precisió. Després de nombroses execucions de simulació amb diferents usos del sòl, condicions hidrològiques, dissenys de sistemes i polítiques operatives, els humans (no els models) poden jutjar millor quins dissenys i polítiques operatives poden proporcionar els beneficis o quines poden tenir els riscos sota el conjunt més plausible de supòsits (Loucks, 2006).

Existeixen diversos programes dissenyats per simular el desenvolupament i la gestió de l'aigua en les conques hidrogràfiques. A continuació es detallen alguns dels models genèrics dissenyats per a ser aplicables a una gran varietat de conques, configuracions del sistema de recurs hídric, condicions institucionals i de gestió.

### **5.3.1. El model AQUATOOL**

Es un model desenvolupat per la Universitat Politècnica de Valencia i està dissenyat per a les etapes de gestió operativa i planificació de la presa de decisions en conques complexes que inclouen diversos embassaments, aqüífers i demandes. Consta de diversos mòduls, un mòdul de simulació (SimWin), un mòdul de gestió d'un sistema de recurs hídric que considera el risc de sequera (SimRisk) i es basa en SimWin, un mòdul d'optimització amb un pas de temps mensual (OptiWin) més detallat que SimWin, i un

mòdul de simulació d'aigua subterrània (AquiVal) per simular la distribució d'aigües subterrànies. La simulació amb SimWin es fa mensualment i permet processos no lineals, com l'evaporació i la infiltració. SimWin permet a l'usuari reproduir les pèrdues d'aigua, les connexions hidràuliques entre nodes, els dipòsits i aquífers i les limitacions de cabal en funció de l'elevació. L'optimització de la xarxa de cabals intenta minimitzar diverses funcions en embassaments, demandes i rius sotmesos a les restriccions de conservació massiva i a les capacitats físiques.

Aquest model requereix un alt nivell d'habilitat i experiència per a la modelització dels recursos. Podeu obtenir més informació a la web de la UPV (<http://www.upv.es/aquatool/>).

### **5.3.2. El model MODSIM**

És un sistema generalitzat de suport a la decisió de la conca hidrogràfica i un model de xarxa de flux desenvolupat a la Universitat de l'estat de Colorado i dissenyat específicament per satisfer les creixents demandes i pressions sobre els gestors de la conca hidrogràfica.

El ràpid creixement dels nuclis de població i la creixent necessitat de regadiu han augmentat notablement la necessitat d'ampliar les fonts d'abastament d'aigua fiables, tot atenent problemes ambientals i ecològics. Els gestors públics de l'aigua han d'afrontar sovint restriccions greus d'acords legals complexos, contractes, regulacions federals, pactes d'estat i pressions de diversos grups d'interès especial. La coordinació òptima d'aquestes facetes dels sistemes de la conca hidrogràfica requereix l'assistència d'eines de modelització informàtiques per prendre decisions racionals de gestió.

MODSIM-DSS va ser dissenyat per a un entorn de gestió de conques hidrogràfiques altament complex i en constant evolució. S'ha relacionat amb models d'aquífers per a l'anàlisi de l'ús conjuntiu de les aigües subterrànies i els recursos d'aigua superficial (MODFLOW).

MODSIM-DSS també s'ha utilitzat amb models de simulació de la qualitat de l'aigua per avaluar l'efectivitat de les estratègies de control de la contaminació (QUAL2E). També es

pot utilitzar amb sistemes d'informació geogràfica (SIG) per gestionar els requisits de bases de dades espacials de la gestió de la conca fluvial.

Aquest model està estructurat en un sistema de suport a la decisió, amb una interfície gràfica d'usuari (GUI, de les sigles en anglès Graphical User Interface) que permet als usuaris crear qualsevol topologia del sistema de conca hidrogràfica. Les estructures de dades plasmades en cada objecte del model estan controlades per un sistema de gestió de bases de dades, que també es consulta mitjançant una simple activació del ratolí.

Els fitxers de dades es preparen de forma interactiva i s'executa automàticament un model eficient d'optimització de la xarxa del flux sense requerir cap intervenció directa de l'usuari. Els resultats de l'optimització de la xarxa es presenten en trames gràfiques.

L'algoritme dona flexibilitat a l'usuari del model per simular operacions de sistemes fluvials complexos.

L'ús del model requereix una formació moderada, mentre que els mòduls externs són bastant difícils d'utilitzar sense habilitats de modelització prèvia. MODSIM es pot descarregar gratuïtament a través de la web de la CSU.

Per a més informació podeu consultar la web de la CSU (<http://modsim.engr.colostate.edu/>).

### **5.3.3. El model RIBASIM (DELTARES)**

És un model genèric per analitzar el comportament de les conques fluvials en diverses condicions hidrològiques desenvolupat per la DELTARES (LA Delft Hydraulics als Països Baixos). Es tracta d'una eina àmplia i flexible que uneix les aportacions hidrològiques amb els usuaris específics de la conca. El model es basa en un marc integrat amb una interfície gràfica orientada a GIS, fàcil d'utilitzar, que permet a l'usuari avaluar diverses mesures relacionades amb la infraestructura, la gestió operativa, la demanda i els resultats en termes de quantitat i qualitat d'aigua. L'anàlisi de la demanda d'aigua és àmplia (és a dir, basada en aspectes demogràfics, econòmics, sobre requisits d'aigua per al cultiu), i es poden comparar les demandes actuals i futures en diferents



horitzons. Es pot avaluar la producció de cultiu i els danys causats per l'escassetat d'aigua.

El model està dissenyat per a qualsevol anàlisi que necessiti simular el balanç hídric d'una conca. El balanç hídric resultant proporciona la informació bàsica sobre la quantitat d'aigua disponible, així com la composició del cabal a cada lloc i en qualsevol moment a la conca. També proporciona els mitjans per preparar aquests balanços amb detall, tenint en compte el drenatge de l'agricultura, els abocaments de la indústria i la reutilització de l'aigua aigües avall. Es generen diversos paràmetres de rendiment de la conca per a l'avaluació de les situacions simulades.

Permet a l'usuari definir escenaris d'operació/planificació on cada escenari es caracteritza per una determinada regla de funcionament i/o projecció de subministrament d'aigua.

És intuïtiu i fàcil d'utilitzar, però requereix dades significatives per realitzar anàlisis detallades. Per a més informació podeu consultar la web de DELTARES ([http:// www.Wldelft.nl/soft/ribasim](http://www.Wldelft.nl/soft/ribasim)).

#### **5.3.4. El model MIKE BASIN**

El model MIKE BASIN va ser desenvolupat per la *Danish Hydraulic Institute* (DHI) a Dinamarca. Està dissenyat per fer front al subministrament d'aigua, al funcionament dels embassaments i als problemes de qualitat de l'aigua. Combina ArcGIS amb la modelització hidrològica per proporcionar solucions a escala de conca. La filosofia d'aquest model és mantenir la modelització senzilla i intuïtiva, alhora que permet aprofundir en la planificació i la gestió del recurs.

L'èmfasi es centra tant en la simulació com en la visualització en l'espai i el temps, fent que sigui adequat per a la comprensió i el consens.

MIKE BASIN representa en forma de branques i nodes totes les característiques de la distribució del recurs hídric com la xarxa hidrogràfica, les subconques, els usuaris, les preses, les centrals hidroelèctriques i els canals de subministrament. Descriu les

demandes multisectorials (ús domèstic, indústria, agricultura, producció d'electricitat, navegació, medi ambient, etc.) així com les prioritats entre cadascun d'aquests usos.

Les àrees d'aplicació típiques són l'anàlisi de la disponibilitat d'aigua, l'ús conjunt d'aigua superficial i subterrània, la planificació d'infraestructures, l'avaluació del potencial de reg i el rendiment dels embassaments, l'estimació de la capacitat d'abastament d'aigua, la determinació dels requisits de tractament d'aigües residuals. El model també s'ha utilitzat per analitzar les demandes ecològiques domèstiques, industrials, agrícoles, hidroelèctriques, navegació, esbarjo i trobar solucions equitables entre elles. Analitza els ecosistemes i la qualitat de l'aigua, els requisits mínims d'abocament, el rendiment sostenible, els efectes del canvi global, la regulació i els drets i les prioritats de l'aigua.

Per a més informació podeu consultar la web (<http://www.dhisoftware.com/mikebasin/>).

### **5.3.5. WARGI-SIM**

El model WARGI-SIM s'ha desenvolupat a la Universitat de Calgary, es tracta d'una eina fàcil d'utilitzar desenvolupada específicament per ajudar els usuaris a entendre les interrelacions entre les demandes i els recursos per a sistemes d'aigua en diverses condicions de sequera, com les produïdes freqüentment a les regions mediterrànies. La capacitat de modelització WARGI inclou diversos macro-mòduls interrelacionats, els principals són un mòdul només de simulació (WARGI- SIM), un mòdul d'optimització determinista (WARGI-OPT), el mòdul d'optimització de la qualitat del dipòsit (WARGI-QUAL) i un mòdul d'optimització d'escenaris (WARGI-SCEN). L'assignació d'aigua a WARGI-SIM es simula mitjançant preferències i prioritats definides per l'usuari. A més, l'usuari pot definir els volums reservats com una funció fixa del període de l'any, i l'aigua retirada de la zona es redueix per satisfer les demandes prioritàries seleccionades per l'usuari.

S'aconsegueixen millores en la definició de mesures de mitigació de la sequera i la vinculació efectiva d'aquestes mesures amb indicadors de sequera mitjançant una integració completa de WARGI-SIM i WARGI-OPT.

WARGI-SIM és un model relativament senzill que permet als no experts comprendre els principals problemes dels sistemes complexos d'aigua.

### 5.3.6. El model WBalMO

És un model desenvolupat per la *WASY Ltd* a Alemanya. Es tracta d'un sistema de simulació interactiu per a la gestió de la conca hidrogràfica. S'ha utilitzat per identificar les directrius de gestió de les conques fluvials, dissenyar els sistemes d'embassament i les seves polítiques operatives i realitzar estudis d'impacte ambiental per a projectes de desenvolupament. Mitjançant una interfície d'usuari ArcView, es construeix una representació de la conca on es deriva una xarxa de fluxos digital existent. Les dades del model es poden modificar posteriorment en diversos escenaris.

Els processos naturals d'escolament i precipitació es simulen estocàsticament (Montecarlo) i les sèries de temps respectives s'equilibren amb els requeriments mensuals d'ús d'aigua i els canvis d'emmagatzematge dels embassaments.

Mitjançant el registre de les característiques del sistema rellevants durant la simulació, es poden proporcionar estimacions de probabilitat per a dèficits d'aigua, mantenint nivells mínims d'escolament o nivells d'embassament. Es poden realitzar simulacions tant en condicions estacionàries com transitòries (per exemple, canvis en el clima). Si es compara diversos escenaris plausibles es pot obtenir una gestió del recurs hídric aproximadament òptima.

La conca hidrogràfica es modelitza a partir de les dades següents:

- Xarxa de cabals amb perfils de balanç desitjats per a la comptabilització precisa dels usos d'aigua, embassaments, transferència d'aigua, etc.
- Zones de captació i les seves sèries de temps d'escolament simulades
- Ubicació dels usos de l'aigua i els seus requisits (taxes d'abocament i captació, escolament mínim)
- Els embassaments i el seu règim de gestió
- Les característiques del sistema desitjades, com ara valors mitjans i valors extrems, freqüències i valors llindars.

WBalMo es pot combinar amb altres algorismes o models per complementar. Això pot ser útil, per exemple, per a tipus específics de gestió de recursos, per implementar un control d'inundació o per abordar problemes de qualitat de l'aigua.

Per a més informació podeu consultar la web <http://www.wasy.de/english/produkte/wbalmo/index.html>

### 5.3.7. El model WEAP

El model WEAP (*Water and Evaluation Planning System*) ha estat desenvolupat per l'Institut de Medi Ambient d'Estocolm i és una eina de programari fàcil d'utilitzar que adopta un enfocament integrat de la planificació del recurs hídric. L'assignació de recursos d'aigua limitats entre usos agrícoles, municipals i mediambientals requereix la plena integració de l'oferta, la demanda, la qualitat de l'aigua i les consideracions ecològiques. WEAP pretén incorporar aquests problemes en una eina pràctica però robusta per a la planificació integrada del recurs hídric. Trobareu les característiques del model a continuació (taula 5.1.)

Característiques del WEAP	
<b>Enfocament integrat</b>	Enfocament únic per a realitzar avaluacions integrades de planificació del recurs hídric
<b>Procés de gestors de l'aigua</b>	L'estructura transparent facilita la gestió de diversos grups d'interès en un procés obert
<b>Balanç hídric</b>	Una base de dades manté informació sobre la demanda i el subministrament d'aigua per generar un model de balanç de massa en una arquitectura de nodes i enllaços
<b>Basat en la simulació</b>	Calcula la demanda d'aigua, l'abastament, l'escolament, la infiltració, els requeriments de cultiu, els fluxos i l'emmagatzematge, i la generació de contaminació, el tractament, l'abocament i la millora de la qualitat de l'aigua en diferents escenaris hidrològics i de polítiques
<b>Escenaris de polítiques</b>	Avalua una gamma completa d'opcions de desenvolupament i gestió de l'aigua i té en compte els usos múltiples i competitiu dels sistemes d'aigua
<b>Interfície fàcil d'utilitzar</b>	Interfície basada en SIG i arrossegament gràfic amb sortida del model flexible com a mapes, gràfics i taules

Taula 5.1. Característiques del model WEAP. Font: SEI (<http://www.weap21.org>)

Proporciona un marc complet, flexible i fàcil d'utilitzar per a la planificació i l'anàlisi de les polítiques. Un nombre creixent de professionals de l'aigua pensen que WEAP és un complement útil dels models, bases de dades, fulls de càlcul i altres programes.

Durant l'última dècada, ha aparegut un enfocament integrat per al desenvolupament de l'aigua que situa els projectes de subministrament d'aigua en el context de la gestió de la demanda i de la protecció de la qualitat de l'aigua i la protecció dels ecosistemes. WEAP incorpora aquests valors, posa en qüestió la igualtat de problemes de demanda, com ara els patrons d'ús d'aigua, les eficiències d'equips, les estratègies de reutilització, els costos i els esquemes d'assignació d'aigua amb temes del subministrament com ara el cabal, els recursos d'aigua subterrània, els embassaments i les transferències d'aigua.

WEAP també es distingeix pel seu enfocament integrat per simular tant els components naturals (demandes d'evapotranspiració, escolament, flux de base) com els components dissenyats (embassaments, bombament d'aigües subterrànies) mantenint informació sobre la demanda i l'oferta d'aigua dels sistemes, permetent al planificador accedir a una visió més completa de l'ampli ventall de factors que s'han de tenir en compte en la gestió del recurs hídric per a l'ús actual i futur.

També és una eina de generació d'escenaris. WEAP simula la demanda d'aigua, l'abastament, l'escolament, els fluxos, l'emmagatzematge, la generació de contaminació, el tractament i la descàrrega i la qualitat de la infiltració d'aigua amb la finalitat d'analitzar polítiques, avaluar una gamma completa d'opcions de desenvolupament i gestió de l'aigua i tenir en compte els usos múltiples i competitiu dels sistemes d'aigua.

WEAP requereix dades significatives i una quantitat moderada d'experiència per a una anàlisi detallada. Per a més informació podeu consultar la web del SEI (<http://www.weap21.org>).

Els models descrits anteriorment es poden utilitzar per a la planificació de projectes de captació, de subministrament d'aigua, encaminament del cabal, gestió dels embassaments, anàlisi de la demanda, anàlisi hidrològic, disponibilitat d'aigua de la captació, anàlisi de la qualitat i sedimentació de l'aigua i aplicacions generals de suport a la gestió de captacions. Tot i això, alguns models són millors en l'anàlisi espacial de la qualitat de l'aigua, la gestió de l'oferta i la demanda en la captació com MIKE BASIN,

mentre que d'altres analitzen millor l'encaminament de rius i embassaments com el model RIBASIM. WaBalMo funciona bé per a tipus específics de gestió de recursos, per implementar un control d'inundacions o per abordar problemes de qualitat de l'aigua. També té l'avantatge de modelitzar els processos naturals d'escolament de la pluja. WEAP integra perfectament tant el model hidrològic com de gestió per proporcionar una millor plataforma per a l'anàlisi de la IWRM. Tot i això, els models que simulen la gestió del recurs hídric i el procés hidrològic són capaços de realitzar simulacions detallades si es disposen de dades suficients i de bona qualitat.

El model Aquatool demana un alt nivell d'habilitat i experiència en la modelització de recursos i s'ha utilitzat sovint en l'estudi de la gestió de les sequeres. El model MODSIM és un model complex i necessita una formació moderada pel model en sí però pels models externs als quals s'uneix són difícils d'utilitzar. El model RIBASIM és intuïtiu i fàcil d'utilitzar però necessita un alt requeriment de dades. El model WARGI-SIM és un model senzill àmpliament utilitzat per la mitigació de les sequeres.

A continuació és pot observar en la taula 5.2. un resum sobre els avantatges i inconvenients dels diferents models.

Model	Avantatges	Inconvenients
AQUATOOL	- Robustesa i flexibilitat per modelitzar gran varietat de sistemes	- Requereix un alt nivell d'habilitat i experiència per a la modelització dels recursos
MODSIM	- Interfície gràfica d'usuari que permet als usuaris crear qualsevol topologia del sistema de conca hidrogràfica.  - Els fitxers de dades es preparen de forma interactiva i s'executen automàticament  - L'algoritme dona flexibilitat a l'usuari per simular operacions de sistemes fluvials complexos	- Requereix una formació moderada  - Els mòduls externs són difícils d'utilitzar
RIBASIM	- Intuïtiu i fàcil d'utilitzar  - Eina àmplia i flexible que uneix les aportacions hidrològiques amb els usuaris específics de la	- Requereix dades significatives per realitzar anàlisis detallades

	conca	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Interfície gràfica orientada a GIS, fàcil d'utilitzar</li> <li>- L'anàlisi de la demanda d'aigua és àmplia i es poden comparar les demandes actuals i futures en diferents horitzons</li> </ul>	
MIKE BASIN	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Modelització senzilla i intuïtiva</li> <li>- Interfície fàcil d'utilitzar</li> <li>- Proporciona una visió en profunditat de la planificació i la gestió</li> <li>- La velocitat de càlcul permet una exploració àmplia, encara que possiblement aproximada, de molts escenaris</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- L'aproximació feta per una solució estacionària es pot veure quan l'escala de temps d'un procés no és inferior a l'escala de temps de la simulació</li> </ul>
WARGI-SIM	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Eina fàcil d'utilitzar</li> <li>- Desenvolupada específicament per ajudar els usuaris a entendre les interrelacions entre les demandes i els recursos en situacions de sequera</li> <li>- Model relativament senzill que permet als no experts comprendre els principals problemes dels sistemes complexos d'aigua</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Molt centrat i àmpliament utilitzat per la mitigació de les sequeres</li> </ul>
WBalMO	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sistema de simulació interactiu per a la gestió de la conca hidrogràfica</li> <li>- Es pot combinar amb altres algorismes o models</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Funciona bé per a tipus específics de gestió de recursos (control d'inundacions, qualitat d'aigua)</li> </ul>
WEAP	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Eina de programari fàcil d'utilitzar</li> <li>- Adopta un enfocament integrat de la planificació del recurs hídric</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Requereix dades significatives i una quantitat moderada d'experiència per a una anàlisi detallada</li> </ul>

Taula 5.2. Avantatges i inconvenients dels diferents models. Font: Elaboració pròpia

Per tant, els models exposats poden ser utilitzats per modelitzar el recurs hídric i establir una sèrie d'anàlisis d'escenaris futurs per definir polítiques de gestió però s'ha

d'escollir un model que s'adapti a les característiques de la zona d'estudi i a les dades que disposem, entre d'altres. En el nostre cas s'ha decidit triar el model WEAP per que es tracta d'una eina fàcil i pràctica d'utilitzar i permet una avaluació integral de la gestió del recurs hídric. El fet de tractar-se d'una eina fàcil d'ús pot ser interessant per a que en un futur pugui ser utilitzada pels diferents gestors del recurs hídric i servir de suport per a la presa de decisions i polítiques ambientals. Una altra de les raons d'escollir aquesta eina és la disponibilitat de les dades històriques d'Andorra. En aquest sentit, no es disposa d'una bona base de dades, aquestes no són públiques i s'han hagut d'anar demanant als diferents agents que treballen en el sector. La recopilació d'aquestes ha estat feixuga i lenta fet que explica que actualment no es disposen de totes les dades. Aquest model, per tant, permet una anàlisi inicial amb una disponibilitat limitada de dades i es pot anar actualitzant a mesura que es vagin completant les dades. Presenta una interfície fàcil d'utilitzar basada en SIG amb l'arrossegament gràfic i amb sortides del model flexibles com a mapes, gràfics i taules per a una anàlisi més fàcil.

Un altre dels criteris per a la elecció d'aquest model WEAP és per què pot enllaçar-se amb el LEAP (Long-range Energy Alternatives Planning) que és un model de planificació energètica que ja està desenvolupat per Andorra (Travesset-Baro, 2017) i permet una avaluació integral del recurs hídric i el sistema energètic d'Andorra.

D'altra banda, una de les limitacions del model WEAP és la integració de la modelització de les aigües subterrànies (Höllermann, Giertz i Dieckkrüger, 2010) però vist que en el cas d'Andorra la major part de l'aigua utilitzada pel consum es extreta directament de les aigües superficials és un aspecte amb un impacte residual per l'aplicació i el marc temporal que es vol treballar en aquesta tesi.

#### **5.4. Modelització integral del cicle de l'aigua amb WEAP**

Una revisió de la literatura revela que la demanda d'aigua apareix sovint en estudis que comparen l'oferta i la demanda d'aigua en termes d'estrès hídric o de la vulnerabilitat dels territoris al canvi climàtic (Beck i Bernauer, 2011; Collet, Ruelland, Estupina, Dezetter i Servat, 2015; Dawadi i Ahmad, 2013; De Graaf, Van Beek, Wada i



Bierkens, 2014; Hejazi et al., 2014; Milano et al., 2013). En aquests estudis s'identifiquen tres problemes principals:

- 1) La demanda d'aigua no sempre es considera com un tot, és a dir, no es comptabilitzen tots els seus components (agrícola, urbana, industrial, energètica)
- 2) L'espacialització de dades no sempre és coherent amb els objectius de l'avaluació del subministrament d'aigua
- 3) La reducció del temps i els "time-step" (passos de temps en la modelització) grans que solen utilitzar, no expliquen amb precisió la variabilitat temporal de la demanda d'aigua.

És important la distinció entre els components de la demanda d'aigua i absolutament necessària per comprendre els conductors dels canvis en la demanda d'aigua i identificar tendències. La dinàmica de cada component de demanda d'aigua i la seva proporció pot variar considerablement en funció de la secció afectada i segons el període considerat. Per tant, cal destacar l'avantatge principal d'utilitzar enfocaments integradors que consideren separatament cada component de demanda d'aigua (Grouillet, Fabre, Ruelland i Dezetter, 2015). En aquesta línia Grouillet et al. (2015), realitzen un estudi on mostren que la demanda d'aigua s'ha incrementat significativament en els últims 40 anys a les conques mediterrànies (conca de l'Ebre i de l'Herault) i revelen variacions espacialment heterogènies. Les simulacions de demanda d'aigua sota tendències antropogèniques i climàtiques el 2050 revelen un augment significatiu de la demanda total d'aigua. Aquestes projeccions mostren que els canvis en la pressió de les activitats humanes influiran en les variacions de la demanda d'aigua més que el canvi climàtic.

El desenvolupament de la societat i les activitats humanes intensives han provocat una disminució important de les fonts d'aigua a tot el món. Recentment, l'esgotament del recurs hídric s'ha accelerat a causa del creixement demogràfic a gran escala, la urbanització, el desenvolupament socioeconòmic i el canvi climàtic (Memon i Butler, 2006). A més, la gestió de l'aigua és un problema complex que implica la població, el medi ambient, l'economia i la política i una manera de conceptualitzar les polítiques de

gestió de l'aigua pot ser la construcció d'un model de simulació (Ahmad i Simonovic, 2004; Le Bars i Le Grusse, 2008; Stave, 2003).

El model WEAP ha estat desenvolupat per avaluar la demanda d'aigua, per realitzar projectes de desenvolupament del recurs hídric, impactes del canvi climàtic i escenaris de gestió de l'aigua.

WEAP pot funcionar com una base de dades per preservar la demanda d'aigua i proporcionar informació, com una eina de pronòstic per estimar el recurs hídric (aigües superficials, aigües subterrànies, transferència d'aigua i emmagatzematge), la demanda (reg, subministrament domèstic i industrial), i l'emmagatzematge (Chinnasamy et al., 2015; Rayej, 2012).

Com a regla general, el model es configura per simular un escenari de referència, on es determina la quantitat d'aigua disponible i les demandes. Existeix una base de dades que conté la informació de la demanda d'aigua i del subministrament per modelitzar el balanç de massa amb una arquitectura de nodes (Figura 5.2.). La simulació es basa en el càlcul de la demanda d'aigua, del subministrament, l'escolament, la infiltració, els requeriments d'aigua dels cultius, els fluxos, l'emmagatzematge, la generació de contaminació, el tractament d'aigües, la descàrrega i la qualitat de la font d'aigua en diferents escenaris hidrològics i polítics. El model avalua una àmplia gamma d'opcions de desenvolupament i gestió de l'aigua i té en compte els usos múltiples i competitius del sistema (Stockholm Environment Institute (SEI), 2020).

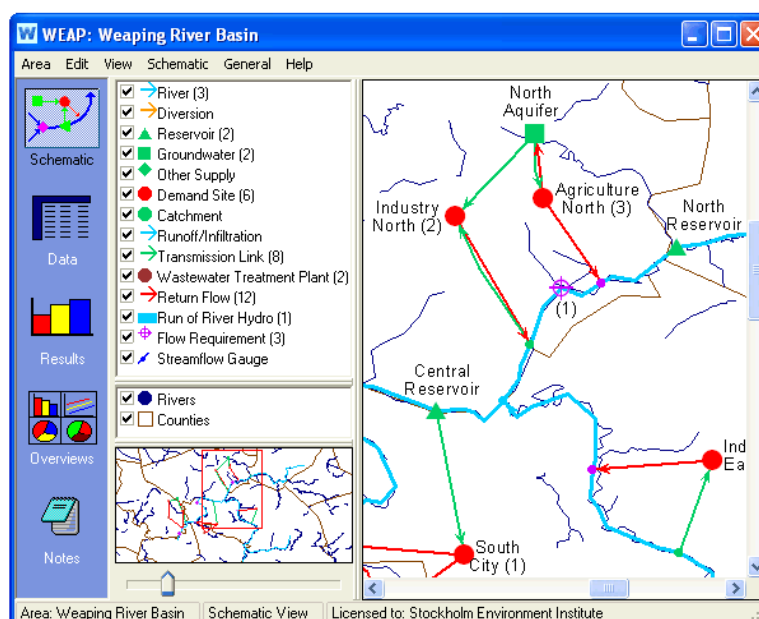


Figura 5.2. Interfície del programa WEAP. Font: SEI (<http://www.weap21.org>)

L'algoritme principal de WEAP és un balanç d'aigua resolt espacialment i calculat mensualment, equilibrant l'oferta i la demanda d'aigua en cada node i enllaç al sistema. Els nodes representen punts de demanda o de subministrament, mentre que els enllaços els connecten. Aquesta estructura de nodes i enllaços permet agrupar i desagregar els components del balanç d'aigua si és necessari, depenent de la hipòtesi de la recerca o de les dades d'entrada disponibles, i és aplicable a totes les escales. Tanmateix, existeix una restricció important, la integració en la modelització de les aigües subterrànies (Höllermann et al., 2010).

El model WEAP opera sota el principi bàsic d'un equilibri hídric i es pot aplicar a una sola conca hidrogràfica o a sistemes de conques hidrogràfiques complexos (World Bank, 2017).

En el nivell més bàsic, el marc d'assignació hidrològica integrat al WEAP reconeix que el recurs disponible d'aigua es defineix per la quantitat de precipitació que cau en una conca hidrogràfica (Figura 5.3) (Yates et al., 2005). A més, aquest recurs disponible s'esgota a través dels processos naturals de la conca, com l'evapotranspiració (Mahmood i Hubbard, 2002). L'aigua que roman en excés (sense tenir en compte l'aigua d'evaporació) a tota la conca hidrogràfica és el recurs disponible per al sistema de gestió

de l'aigua. Per tant, en el model WEAP hi ha un vincle entre el clima, l'ús del sòl i la gestió del sistema hídric (Purkey, Huber-Lee, Yates, Hanemann, i Herrod-Julius, 2007).

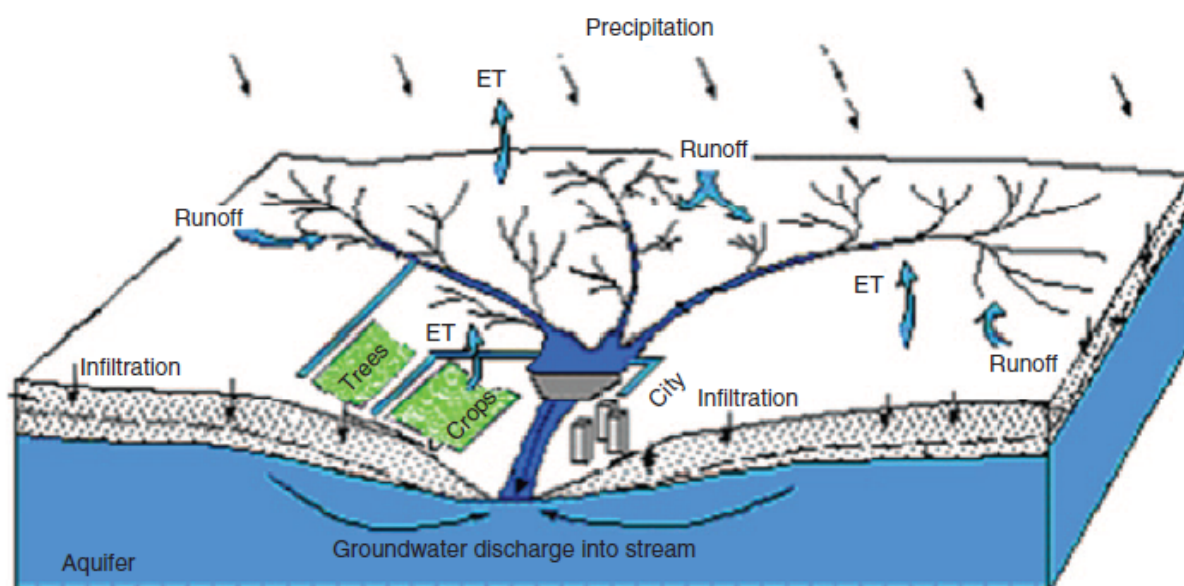


Figura 5.3. Conceptualització de processos hidrològics integrats i operacions de gestió de l'aigua amb el model WEAP. Font: Yates et al., 2005

Aquesta eina integrada de planificació del recurs hídric s'utilitza per representar actualment les condicions de l'aigua en una àrea determinada i per poder explorar una àmplia gamma d'opcions de demanda i subministrament per a una gestió sostenible del recurs. Es àmpliament utilitzat per donar suport a la planificació del recurs hídric proporcionant un marc analític i de gestió de dades comú per implicar els grups d'interès i els responsables en un procés de planificació obert.

Dins d'aquest entorn, el model WEAP s'utilitza per desenvolupar i avaluar una varietat d'escenaris que explora els canvis físics del sistema, com ara nous embassaments o oleoductes, així com els canvis socials, com polítiques que afecten el creixement de la població o els patrons d'usos de l'aigua.

La modelització de la conca hidrogràfica mitjançant WEAP consisteix en els següents passos (Lévite, Sally, i Cour, 2003):

- 1) Definició de l'àrea d'estudi i marc temporal. La configuració del marc temporal inclou l'últim any de creació d'escenaris (darrer any d'anàlisi) i l'any inicial d'aplicació. La

definició de l'àrea d'estudi inclou la configuració d'un diagrama esquemàtic (Figura 5.6) que inclogui els límits de la conca hidrogràfica, els rius, les conques o subconques i els diferents elements de la demanda d'aigua.

- 2) Creació de les “Current Accounts” que és tracta de la situació existent del recurs hídric de la zona d'estudi. S'especifica els recurs hídric disponible i diversos nodes de demanda existents. Es pot utilitzar per a la calibració del model per adaptar-lo a la situació existent de la zona d'estudi.
- 3) Creació d'escenaris a partir de supòsits basats en dades històriques, polítiques, costos, plans de desenvolupament, tendències hidrològiques i tecnològiques i altres factors relacionats.
- 4) Avaluació dels escenaris en relació amb la disponibilitat del recurs hídric per a la zona d'estudi. Els resultats generats per la creació d'escenaris poden ajudar al planificador del recurs hídric en la presa de decisions, que és el nucli d'aquest estudi.

Com a eina d'anàlisi de polítiques, pot simular una àmplia gamma d'escenaris en el desenvolupament i la gestió de l'aigua per tal de respondre a diverses preguntes sobre “què passa si ...?” (Sieber i Purkey, 2015), com per exemple:

- I si canvia la taxa de creixement de la població?
- I si s'intensifica l'agricultura?
- I si augmenta el nombre d'unitats industrials?
- I si canvien els patrons de precipitació?
- I si augmenta la temperatura mitjana?
- Què passa si es construeixen preses hidroelèctriques?
- I si tenim nous recursos?
- i si hi ha un augment significatiu en mesures d'eficiència i estalvi d'aigua?

En els últims anys s'ha utilitzat el model WEAP en diversos estudis per simular el sistema integral de l'aigua en diferents escenaris de canvi climàtic. Berredjem & Hani, 2017 integren dades al model WEAP per simular el balanç hídric actual i futur i després

analitzar la situació de l'aigua en diferents escenaris, el desenvolupament socioeconòmic i el canvi climàtic al 2050 a Seybouse Valley (Algeria). Zhang, Gu, Lu, i Wang (2017), avaluen i analitzen la vulnerabilitat de la generació d'energia hidroelèctrica entre el 2016-2050 a partir de dades obtingudes de models de canvi climàtic a la conca del riu Yangtze a la Xina. En aquest cas, utilitzen el model WEAP com un enfocament integrat per avaluar els sistemes d'aigua i energia hidroelèctrica i les seves implicacions en la política. Flores-López, Galaitsi, Escobar i Purkey, (2016), desenvolupen un model WEAP als Andes peruans per simular els impactes de possibles canvis dins del sistema hidrològic per ajudar els decisors a planificar el desenvolupament sostenible de la regió constituït d'un ecosistema únic d'aiguamolls alpins tropicals. Aquest estudi utilitza el model del sistema WEAP per simular el subministrament d'aigua, l'assignació i la infraestructura per a les conques hidrogràfiques. S'arriba a la conclusió que les alteracions humanes constitueixen els principals factors que afecten el subministrament d'aigua. Rochdane, Reichert, Messouli, Babqiqi, i Khebiza (2012), analitzen la futura situació de l'aigua de Rheraya (Marroc) sota diferents escenaris de desenvolupament socioeconòmic i canvi climàtic fins a l'any 2100. Els resultats mostren que la pressió sobre el recurs hídric de Rheraya augmentarà, donant lloc a una major competència per l'aigua superficial, que les demandes domèstiques, turístiques, ramaderes i agrícoles no es compliran cap a l'any 2100 i que la demanda mitjana anual d'aigua no satisfeta augmentarà dramàticament a la regió en les pròximes dècades. Els resultats també demostren que les avaluacions d'estratègies d'adaptació preses pels responsables són efectives però no sostenibles per a la conca hidrogràfica. Els efectes del canvi climàtic podrien reafirmar la urgència d'implementar noves polítiques i reformes sense demora per tal que la gestió del recurs hídric sigui més sostenible per al medi ambient, social, econòmic i financer. Höllermann et al. (2010), modelitzen l'equilibri hídric de la conca d'Ouémé-Bonou (Benín, Àfrica Occidental) amb WEAP. Aquest estudi va tenir com a objectiu analitzar la futura situació de l'aigua de Benín en diferents escenaris de desenvolupament socioeconòmic i canvi climàtic fins al 2025. Els resultats mostren que la pressió sobre el recurs hídric de Benín augmentarà. Aquests resultats amb el model WEAP ofereixen una base sòlida per ajudar els planificadors a desenvolupar recomanacions per a la futura gestió del recurs hídric.

Per tant, aquest model és utilitzat àmpliament en el món de la gestió del recurs hídric sota diferents problemàtiques com poden ser la disponibilitat de l'aigua per a la demanda domèstica, d'energia hidroelèctrica, agrícola, ramadera, turística, etc. WEAP ha estat dissenyat com a eina per ajudar els gestors a veure de forma més clara les conseqüències de les decisions construint models locals. D'aquesta manera, els models poden ajudar a guiar els futurs responsables de la gestió de l'aigua a realitzar actuacions que aconseguixin els objectius esperats.

Aquesta recerca pretén desenvolupar una imatge clara de la demanda i l'oferta en un model que pugui ajudar a comprendre la situació a Andorra per tal de proposar estratègies de gestió del recurs hídric que vagin en la línia del marc del conveni de les Nacions Unides sobre Canvi Climàtic (Govern d'Andorra, 2019) i del procés d'adaptació d'Andorra al canvi climàtic (PAACC) (Govern d'Andorra, 2014), que remarquen la importància d'estudiar els impactes sobre el recurs hídric per tal de començar a dissenyar i desenvolupar mesures i estratègies d'adaptació el més aviat possible.

## **5.5. Model WEAP-Andorra**

Aquest capítol detalla la modelització de la demanda d'aigua amb el model WEAP i la construcció d'escenaris per explorar diferents situacions i avaluar com canvis climàtics i socioeconòmics (turisme, aspectes demogràfics, entre altres) afectaran a la futura demanda d'aigua a Andorra. La conca d'Andorra és interessant perquè subministra aigua domèstica però també rep molt turisme i aquest consum en aigua pot ser important en determinats períodes de l'any. Per tant, el model WEAP ens ajudarà a estudiar aquestes interrelacions entre els diferents sectors i usos de l'aigua. Actualment es disposa de suficient recurs per fer front a les demandes però serà interessant veure com canvis previstos en un futur alteraran espacial i temporalment el recurs hídric i conseqüentment el subministrament d'aigua necessaris per als diferents tipus de demandes. Aquests resultats permetran actuar amb previsió i avaluar si la demanda d'aigua futura es podrà satisfer en condicions ambientals i socioeconòmiques canviants i avaluar polítiques i accions per una gestió sostenible del recurs.

El model WEAP-Andorra es configura a partir d'un escenari de referència on es determina la quantitat d'aigua disponible i les demandes d'aigua. En aquest cas s'ha

treballat amb l'any 2015 per una major disponibilitat de les dades necessàries per la millor caracterització possible de la despesa hídrica. El model estima l'evolució del recurs des de l'actualitat fins l'any 2050. La Figura 5.4 mostra l'estructura principal del model WEAP-Andorra.

Com a dades d'entrada, el model s'alimenta amb les dades de recurs hídric en diferents punts i dades de les diferents demandes d'aigua per parròquies i per tipus (domèstic, hotel, professional i neu artificial). La taula 5.3. mostra la descripció i la font de les dades.

<b>Dades</b>	<b>Descripció</b>	<b>Font</b>
Dades hidrològiques	Dades de cabals d'aigua dels rius a la capçalera	Govern d'Andorra (Govern d'Andorra, 2018)
Dades de demanda	Domèstica, hotels, professional, agricultura, ramaderia	Govern d'Andorra i diferents comuns
Dades demanda neu artificial	Dades del consum d'aigua dels canons	Pistes d'esquí (SAETDE-Grau-Roig) i Govern d'Andorra

Taula 5.3. Descripció de les dades i les fonts d'obtenció utilitzades per desenvolupar el model WEAP. Font: Elaboració pròpia



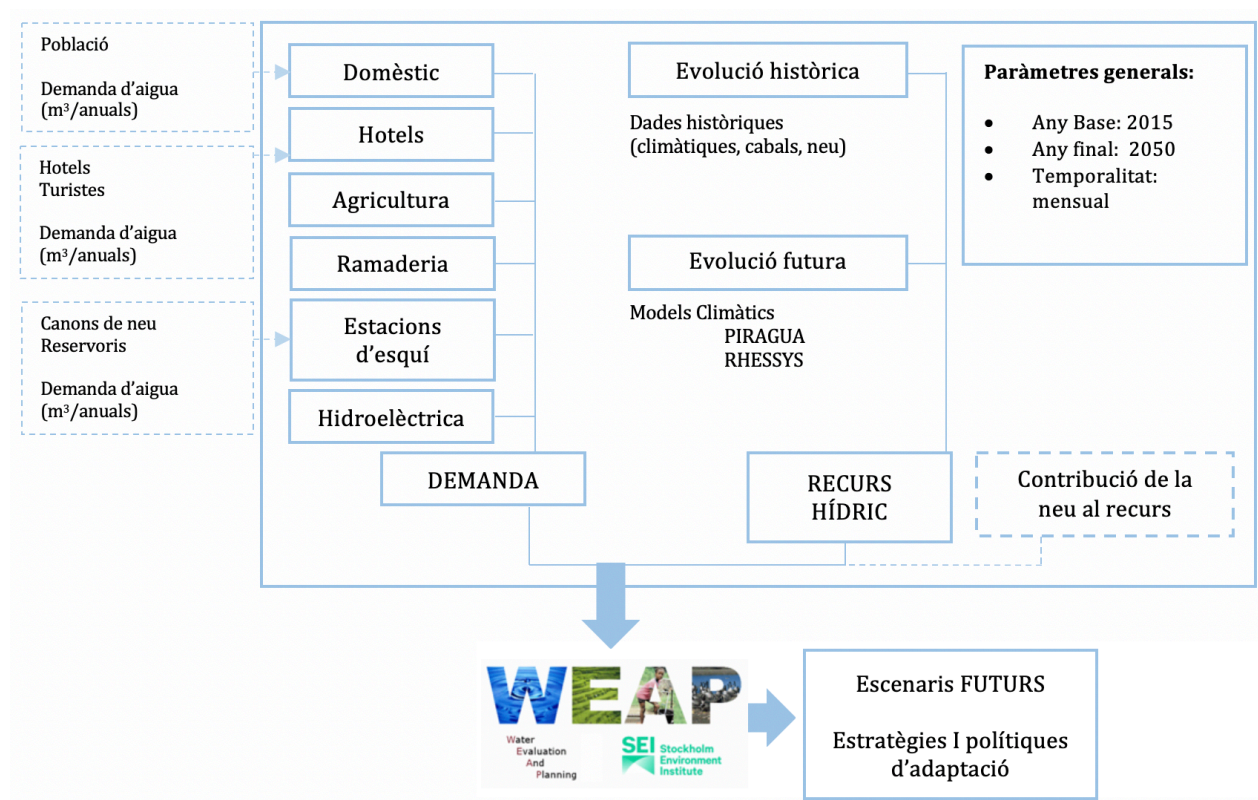


Figura 5.4. Estructura del model WEAP-Andorra. Font: Elaboració pròpia

### 5.5.1. Definició de l'àrea d'estudi

El model WEAP-Andorra està generat per les tres conques principals, la Conca del Valira del Nord, la Conca del Valira d'Orient i la Conca del Gran Valira que engloba tot Andorra. En aquestes conques trobem el riu Valira del Nord, el Valira d'Orient i el riu Gran Valira que és el resultat de la confluència entre els dos rius anteriors. Les dades d'entrada dels cabals dels rius venen definides per les dades del mapa del pla sectorial d'infraestructures d'Andorra (Govern d'Andorra, 2018). Es defineix com a any base el 2015 per la disponibilitat de dades d'entrada més fiables i completes i a partir de les quals es projectaran les demandes futures. Les dades de l'any base corresponent serviran a tots els escenaris com a base per a les seves projeccions.

Per aquest primer model WEAP-Andorra, les dades climàtiques i d'usos del sòl es treballen amb el model RHESSys i les sortides d'aquest model hidrològic serviran per alimentar el model WEAP-Andorra.

### 5.5.2. Anàlisi hidrològica

Aquesta anàlisi s'ha efectuat amb el model hidrològic RHESSys i no serà calculada amb el mòdul del model WEAP. Tal i com s'ha desenvolupat en el capítol 3, s'ha forçat el model hidrològic RHESSys per tal d'avaluar els efectes del canvi climàtic i els usos del sòl i generar diferents escenaris de canvi futur que es faran servir d'entrada al model.

S'han identificat tres rius principals, el riu Valira del Nord, el riu Valira d'Orient i el Gran Valira i altres rius secundaris més petits (Figura 5.5). S'introdueixen les dades de cabal de capçalera definides en el pla sectorial d'infraestructures d'Andorra. Aquest mapa ens dona cabals interanuals mitjos estimats pel període 1971-2014 distribuïts mensualment en funció de les condicions hidrològiques i les característiques climàtiques del país (Govern d'Andorra, 2018) (Taula 5.4).

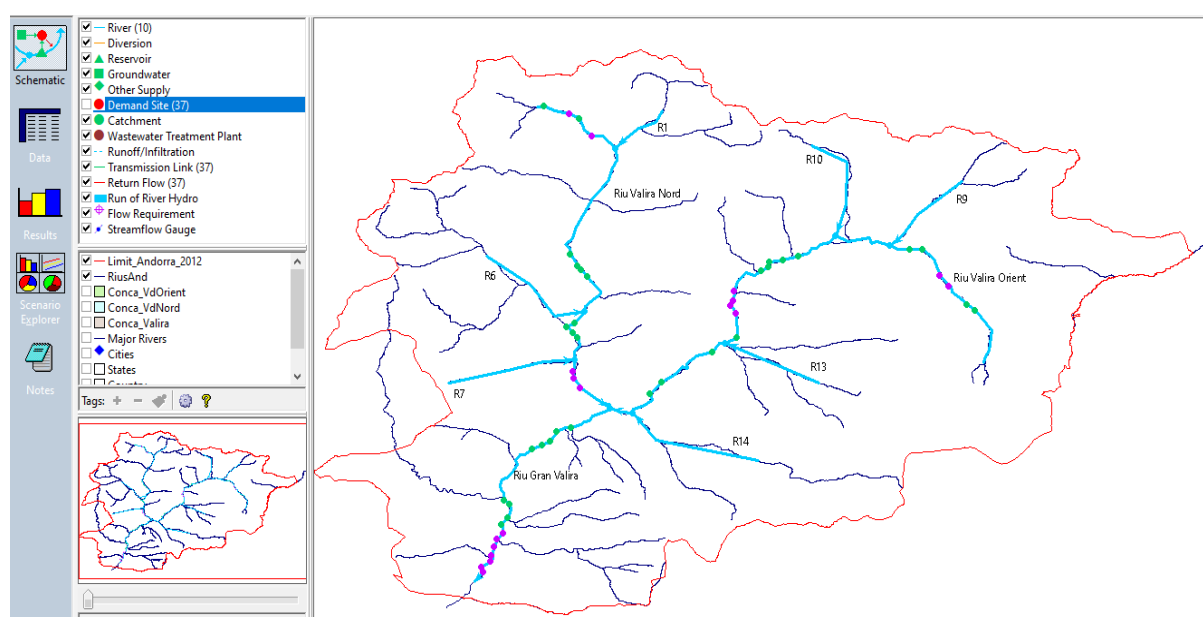


Figura 5.5. Esquema dels diferents rius definits en el model WEAP-Andorra. Font: Elaboració pròpia a partir de la modelització WEAP

	Gen	Feb	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Des	Total
<b>Gran Valira</b>	5,07	4,51	7,09	13,63	24,31	20,91	8,66	5,16	4,24	5,43	6,35	5,07	9,21
<b>Valira Nord</b>	0,19	0,17	0,27	0,52	0,92	0,79	0,33	0,20	0,16	0,21	0,24	0,19	0,35
<b>Valira Orient</b>	0,20	0,18	0,28	0,55	0,98	0,84	0,35	0,21	0,17	0,22	0,26	0,20	0,37
<b>R1</b>	0,34	0,30	0,48	0,92	1,64	1,41	0,58	0,35	0,29	0,37	0,43	0,34	0,62
<b>R6</b>	0,47	0,42	0,66	1,27	2,27	1,95	0,81	0,48	0,40	0,51	0,59	0,47	0,86
<b>R7</b>	1,97	1,76	2,76	5,31	9,48	8,15	3,37	2,01	1,65	2,12	2,48	1,97	3,59
<b>R9</b>	0,46	0,41	0,64	1,23	2,19	1,88	0,78	0,46	0,38	0,49	0,57	0,83	0,83
<b>R10</b>	0,28	0,25	0,39	0,74	1,32	1,14	0,47	0,28	0,23	0,30	0,35	0,28	0,5
<b>R13</b>	0,41	0,37	0,58	1,11	1,98	1,70	0,71	0,42	0,35	0,44	0,52	0,41	0,75
<b>R14</b>	0,51	0,46	0,72	1,38	2,46	2,11	0,87	0,52	0,43	0,55	0,64	0,51	0,93

Taula 5.4. Dades de cabals (m<sup>3</sup>/s) dels diferents rius definits en el model WEAP-Andorra pel 2015. El valor total és extret del pla d'infraestructures i és distribuït mensualment. Font: Elaboració pròpia

### 5.5.3. Demanda d'aigua

En primer lloc s'ha establert un diagrama esquemàtic de l'àrea d'estudi (Figura 5.6.) tal com s'aplica a WEAP. Posteriorment s'han definit els nodes de demanda com un conjunt d'usuaris d'aigua que comparteixen un sistema de distribució física dins d'una regió definida o que comparteixen un punt de subministrament (Yates et al., 2005). Els nodes de demanda en aquest estudi s'han classificat en sis incloent la demanda domèstica, la dels hotels, la demanda professional, l'agricultura i ramaderia i la demanda de les estacions d'esquí. Cada node de demanda té un enllaç de transmissió de la seva font i un enllaç de retorn directament al riu. El retorn de les aigües residuals va directament a l'EDAR de cada sistema i l'aigua retorna al medi posteriorment. Els diferents sistemes col·lectors d'aigües residuals a Andorra són:

- Sistema nord occidental: recull les aigües residuals des d'El Serrat passant per Ordino i La Massana. El Camp de Neu d'Ordino-Arcalís es saneja amb dos sanejaments autònoms.
- Sistema nord oriental: recull les aigües residuals des de Soldeu fins a Canillo.
- Sistema sud: recull les aigües residuals des d'Encamp fins a Sant Julià de Lòria, passant per Escaldes-Engordany i Andorra la Vella.

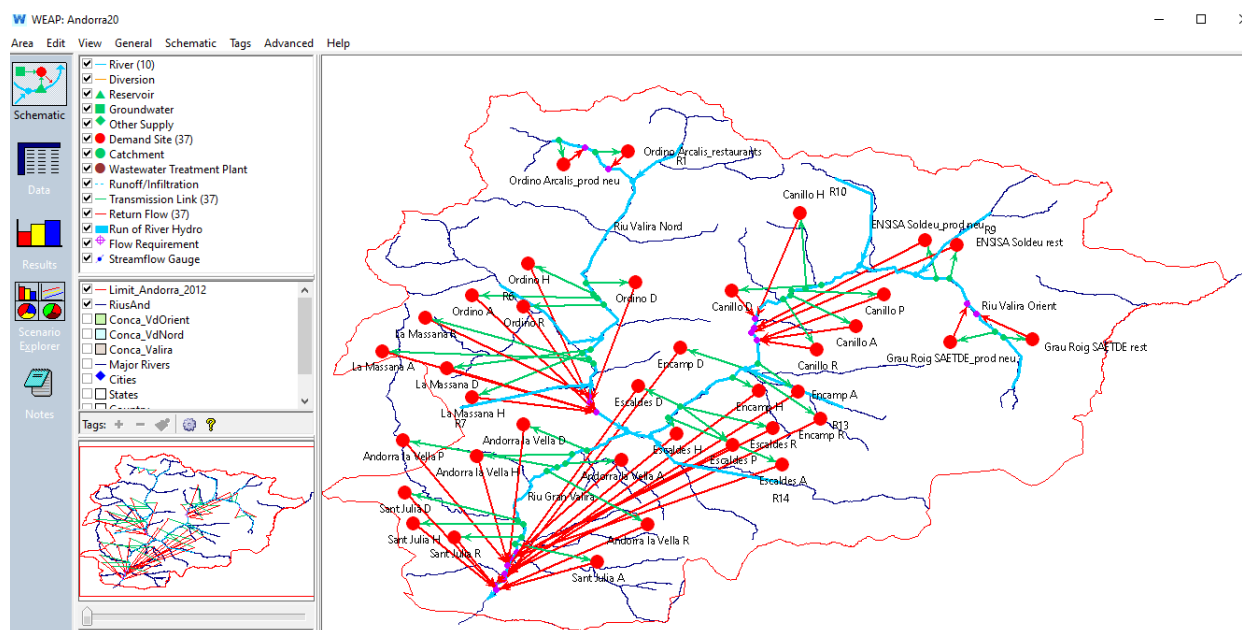


Figura 5.6. Nodes de demanda i enllaços pel model WEAP-Andorra. Font: Elaboració pròpia a partir de la modelització WEAP

Una vegada establert el diagrama esquemàtic de la nostra zona d'estudi s'introdueixen les dades. La demanda d'aigua ve definida per una sèrie de paràmetres:

- **El nivell d'activitat anual:** La demanda anual representa la quantitat d'aigua requerida per cada demanda. El consum d'aigua de cada node de demanda es calcula multiplicant el nivell d'activitat anual per una taxa d'ús d'aigua en funció de la variació mensual de cada node de demanda.
- **Taxa anual d'ús d'aigua:** És el consum mitjà anual d'aigua per unitat d'activitat. WEAP mostra el denominador per emfatitzar que es tracta d'una taxa per unitat, no de la quantitat total d'aigua que s'utilitza. En aquest estudi s'utilitza una taxa d'ús anual d'aigua per habitant, per edifici, per hectàrea i per cap de bestiar.
- **Consum:** correspon al percentatge d'entrada d'aigua consumit.
- **Variació mensual:** La variació mensual és important i s'ha basat en el requeriment mensual de cada tipus de demanda, per exemple, l'ús d'aigua domèstica pot mantenir-se constant durant tot l'any mentre que la demanda d'aigua agrícola varia considerablement cada mes en funció del requeriment d'aigua de cultiu i del període de cultiu. Si la demanda és constant durant tot l'any, la variació mensual s'ha de deixar en blanc. En cas contrari, s'haurà d'introduir el percentatge d'aigua anual que s'utilitza cada mes. La variació mensual de la demanda d'aigua domèstica, dels hotels

i professional es calcula a partir de les dades de consums mensuals pel 2015 i depèn de cada parròquia. La variació mensual en agricultura es basa en el requisit mensual de reg per al cultiu de tabac de la zona d'estudi. Es considera una demanda d'aigua nul·la de gener a maig i d'octubre a desembre, pels mesos de juny, juliol, agost i setembre es considera una variació de la demanda d'aigua del 20 %, 35 %, 35 % i 10 % respectivament per a totes les parròquies. La variació mensual per a la fabricació de neu artificial s'ha establert a partir de les dades facilitades per SAETDE-Grau Roig i aquesta variació s'ha aplicat a totes les estacions d'esquí per què no s'han aconseguit les dades per la resta d'estacions d'esquí.

També s'han definit unes prioritats de la demanda (de 0 a 99) on 1 representa el node de demanda de prioritat més elevada mentre que 99 representa el node de demanda de prioritat més baixa. Les prioritats de la demanda representen el nivell de prioritat per a l'assignació del recurs. Primer es subministraran les demandes amb les màximes prioritats. Pel cas de les demandes d'aigua a Andorra per a l'escenari base s'han definit totes com a prioritat 1 degut a que en l'actualitat no hi ha tensió en l'ús del recurs.

La Taula 5.5. sintetitza les dades introduïdes al model WEAP-Andorra. Algunes de les dades de detall dels consums sectorials no es disposen en l'actualitat ja que la recollida i seguiment dels comuns o el Govern no baixa a aquest nivell de detall. En aquests casos aquests valors han estat estimats i interpolats a partir de parròquies amb comportament del consum similars. Aquestes assumpcions són les dades que es mostren en color vermell en la taula de valors d'entrada de la demanda.

	Canillo	Encamp	Ordino	La Massana	Andorra la Vella	Sant Julià de Lòria	Escaldes- Engordany
<b>DOMÈSTICA</b>							
Nivell Activitat Anual (habitants)	4124	9809	4687	10359	22886	9379	14367
Taxa anual ús d'aigua (m³/habitants/any)	30,22	57,77	34,80	75,36	49,53	53,96	100,87
Consum (%)	21,57	71,37	37,62	59,84	31,30	60,00	64,34
<b>HOTELS</b>							
Nivell Activitat Anual (edificis)	83	74	36	54	43	13	38
Taxa anual ús d'aigua (m³/edificis/any)	926,94	753,95	2654,69	753,95	7191,91	753,95	12709,42
Consum (%)	13,32	7,03	22,04	3,12	8,54	1,16	21,44
<b>PROFESSIONAL</b>							
Nivell Activitat Anual (edificis)	33				524		506
Taxa anual ús d'aigua (m³/edificis/any)	156,48				856,81		856,43
Consum (%)	0,89	1,27			19,93		19,24
<b>AGRICULTURA</b>							
Nivell Activitat Anual (ha)	421,81	197,51	298,58	327,53	42,84	643,43	86,15
Taxa anual ús d'aigua (m³/ha/any)	216,19	1604,39	497,99	936,01	4504,22	750,60	1456,98
Consum (%)	15,78	39,91	34,29	23,50	5,33	57,26	5,57
<b>RAMADERIA</b>							
Nivell Activitat Anual (cap de bestiar)	521	1891	334	752	133	1806	46
Taxa anual ús d'aigua (m³/cap de bestiar/any)	7,68	13,04	28,61	17,41	26,37	6,67	26,37
Consum (%)	0,69	3,11	2,20	1,00	0,10	1,43	0,05
			Ordino-Arcalís	SAETDE-Pas de la Casa-Grau Roig	Ensisa (Soldeu- El Tarter)	VallNord Pal-Arinsal	
<b>NEU ARTIFICIAL (m³/temporada)</b>							
Nivell Activitat Anual (unitat de producció)		85940		437694		526080	143198
Taxa anual ús d'aigua (m³/ unitat de producció /any)		1		1		1	1
Consum (%)		100		100		100	100

Taula 5.5. Dades d'entrada de la demanda per l'any base requerides pel model WEAP-Andorra. Font: Elaboració pròpia

### 5.5.4. Calibració i validació del model

La complexitat dels models d'assignació d'aigua i el fet que se'ls requereix per simular el comportament humà (per reflectir els canvis en la demanda) a més dels processos físics fa que la calibració i validació del model sigui extremadament difícil i en molts casos fins i tot s'obvii (Arranz i McCartney, 2007). Per validar el model, s'han utilitzat les dades de demanda facilitades pels Comuns per a totes les parròquies. S'han introduït les dades per l'any base 2015 i s'han verificat les dades simulades pels anys 2016, 2017 i 2018 amb les dades observades que disposem. WEAP no té una rutina de calibració automàtica, per tant, es van provant manualment els canvis implementats comparant les sèries de temps simulades i observades.

Per a la validació del model s'han agafat les dades de consums dels informes del *Balanç hídric del Govern d'Andorra* i s'han comparat amb els resultats dels consums del model WEAP simulats per als anys 2016, 2017 i 2018. A continuació es pot observar la comparació entre aquestes demandes domèstiques per a les diferents parròquies observades i les simulades en el model WEAP del 2016 al 2018 (Figura 5.7 i 5.8).

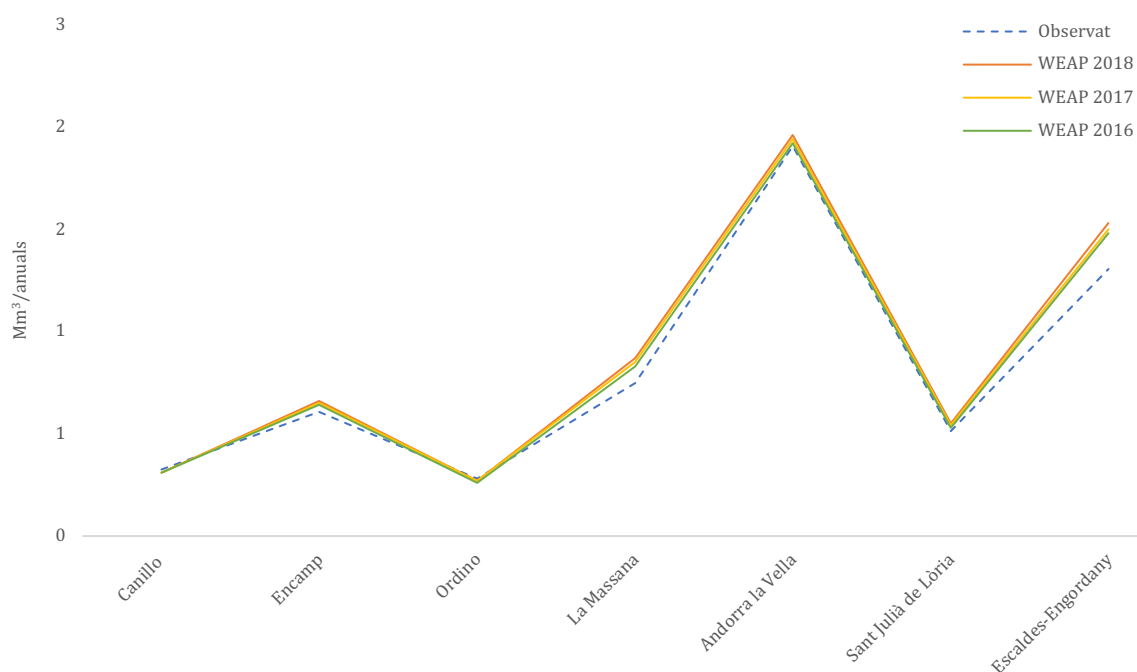


Figura 5.7. Diferència entre els consums domèstics facturats observats ( $\text{Mm}^3/\text{anuals}$ ) de les dades dels informes de Balanç hídric del Govern d'Andorra i dels consums simulats ( $\text{Mm}^3/\text{anuals}$ ) en el model WEAP pel 2016, 2017 i 2018. Font: Elaboració pròpia

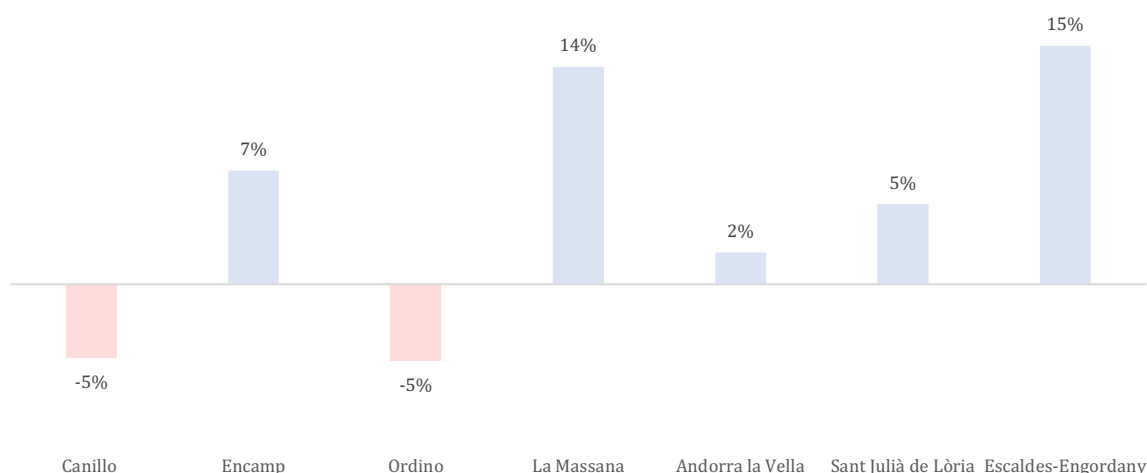


Figura 5.8. Diferència entre els consums domèstics facturats observats (%) i els consums simulats (%) en el model WEAP. Font: Elaboració pròpia

Les diferències entre les dades observades i les simulades van del -5 % al 15 % entre els consums domèstics facturats de Govern i els resultats de les demandes simulades amb el model WEAP. Destacar que sovint és complicat comparar aquestes dades ja que no totes les parròquies disposen de consums diferenciats entre usos o almenys no publiquen aquestes dades en l'actualitat. Per tant, es consideren aquestes diferències entre les demandes acceptables. En els informes del Govern d'Andorra, la majoria de dades estan segregades i no es coneixen els diferents tipus de consums. Un dels treballs en un futur seria poder aconseguir les dades dels consums trimestrals dels diferents usos per a les diferents parròquies i així poder afinar l'anàlisi de la demanda d'aigua. Això no s'ha pogut fer per aquesta tesi perquè aconseguir les dades únicament pel 2015 ja ha sigut una tasca feixuga i que ens ha ocupat entre sis mesos i un any.

#### 5.5.5. Creació d'escenaris

Els escenaris són històries consistents de com pot evolucionar un sistema futur amb el pas del temps en un entorn socioeconòmic i conjunt de condicions polítiques i tecnològiques determinat (Stockholm Environment Institute, 2016). Mitjançant WEAP, es poden crear escenaris i es poden comparar per avaluar els seus requeriments d'aigua, els costos i els impactes ambientals. Els escenaris poden tractar una àmplia gamma de preguntes "què passa si...?". WEAP distingeix entre un escenari de referència o "business



as usual" (BAU) i escenaris de polítiques alternatives (Raskin, Sieber i Huber-Lee, 2001). L'escenari de referència es basa en la continuació dels patrons actuals i representen els canvis que es podrien produir en el futur sense intervenció ni noves mesures polítiques. Aquest escenari de referència servirà com a base per a la resta d'escenaris. La Figura 5.9 mostra com s'estructuren els diferents escenaris en el model WEAP.

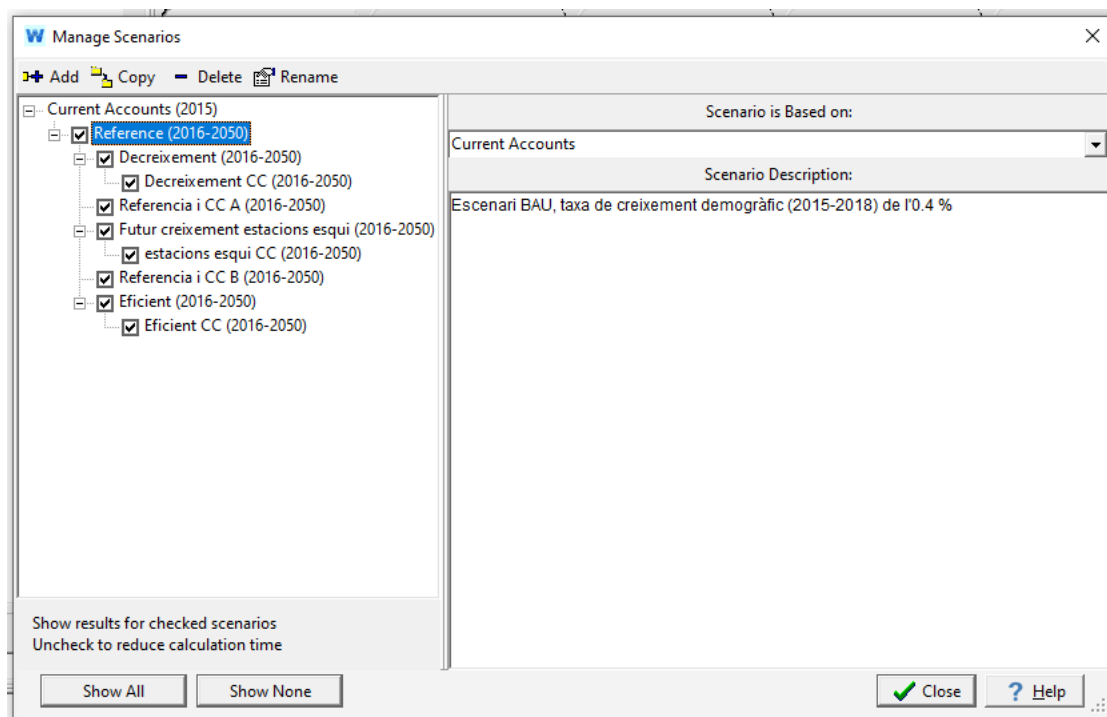


Figura 5.9. Estructura i descripció dels escenaris en el model WEAP-Andorra. Font: Font: Elaboració pròpia a partir de la modelització WEAP

L'any 2015 s'ha establert per a les condicions inicials, del 2016 al 2018 s'ha utilitzat per a la validació i la simulació d'escenaris es projecten fins al 2050.

Es creen una sèrie d'assumpcions per a poder simular els escenaris. Els escenaris desenvolupats volen explorar la demanda i la disponibilitat d'aigua futures a partir dels escenaris de canvi climàtic generats amb el model hidrològic RHESSys i combinats amb els escenaris d'evolució socioeconòmica que inclouran canvis en la demografia, en el turisme i en la producció de neu artificial. Per tant, els escenaris inclouran quatre possibilitats:

- i si augmenta o disminueix la demanda d'aigua?
- i si canvia el clima i disminueix la disponibilitat de recurs hídric?
- i si augmenta o disminueix el turisme?

-i si augmenta la producció de neu artificial?

La taula 5.6 presenta un resum dels escenaris que s'han simulat al model WEAP-Andorra. Posteriorment es definirà cada escenari en detall i els resultats obtinguts. Els canvis en percentatge fan referència al canvi produït al 2050 respecte l'actualitat.

Escenaris	Referència	Decreixement	Futur creixement producció de neu artificial	Eficient
Població	20 %	-10 %	20 %	20 %
Hotels	-	-30 %	15 %	-
Consum hotel	-	-	-	-24 %
Consum domèstic	-	-	-	-15 %
Producció de neu	-	-	25 %	-

Taula 5.6. Característiques dels diferents escenaris socioeconòmics pel model WEAP-Andorra. Font: Elaboració pròpia

Escenaris Climàtics	t2p0	t2p-20	t4p0	t2p20	t4p-20
Temperatura	2 °C	2 °C	4 °C	2 °C	4°C
Precipitació	0 %	-20 %	0 %	20 %	-20 %
Cabal	-9 %	-36 %	-14 %	24 %	-40,5 %

Taula 5.7. Característiques dels diferents escenaris climàtics pel model WEAP-Andorra. Font: Elaboració pròpia

Escenaris	AFOR + t2p0	MANAGEFOR + t2p0
Cabal	-8,5 %	-3,95 %

Taula 5.8. Característiques dels escenaris combinats d'usos del sòl i climàtics pel model WEAP-Andorra. Font: Elaboració pròpia

Cada escenari socioeconòmic es combinarà amb els escenaris de canvi climàtic (Taula 5.7). Els escenaris combinats d'usos del sòl i canvi climàtic (Taula 5.8) es combinaran pel cas de l'“AFOR + t2p0” (equivalent a un escenari RCP 4.5 del IPCC al 2050) amb l'escenari de referència i el “MANAGEFOR + t2p0” amb l'escenari eficient.

D'altra banda, per avaluar la disponibilitat de recurs hídric i les possibles tensions futures és imprescindible considerar aquella part imprescindible del recurs que s'ha de garantir per l'equilibri i la sostenibilitat dels ecosistemes fluvials. Per aquest motiu s'ha afegit al model un criteri on es considera el cabal ecològic. Aquest criteri considera que un 20 % durant els mesos d'octubre a març i un 40 % d'abril a setembre segons dades del Govern d'Andorra (2018) s'han de garantir com a cabal mínim ecològic. Un segon criteri a considerar a l'hora d'avaluar la quantitat de recurs hídric disponible per usos socioeconòmics és el fet que segons les infraestructures actuals la capacitat màxima de captació d'aigua de la xarxa Andorrana s'estima al voltant del 45 % del total del recurs (comunicació oral dels tècnics d'aigua de Govern). Aquesta suposició s'efectua en base a estimacions sobre les captacions d'aigua registrades i conegudes i en el màxim captat durant els últims anys, uns 150 hm<sup>3</sup> anuals aproximadament (Govern d'Andorra, 2020a).

#### **5.5.5.1. Escenari de referència**

En l'escenari de referència o de continuïtat, a vegades referenciats com a BAU (Business As Usual amb les seves sigles en anglès) reproduceix la continuïtat de la tendència dels darrers anys en les variables del model com poden ser la variació de la població, dels ratis de consum per habitant, el turisme, entre d'altres, assumint que tot es manté constant sense cap canvi.

La demanda d'aigua en aquest escenari evolucionarà d'acord amb el creixement poblacional estimat pel 2050 tenint en compte la tendència de creixement produït durant la darrera dècada (2009-2018). L'evolució futura de la població es basa en la taxa de creixement calculada a partir de les dades de població registrades al departament d'estadística d'Andorra (Govern d'Andorra, 2020b). Es calcula la mitjana anual de la taxa de creixement de la població per al període 2009-2018 en la qual es preveu un augment del 0,4 % anual, per tant, un augment d'aproximadament 20 % a l'horitzó 2050. La Figura 5.10 mostra l'evolució de la població històrica i futura.

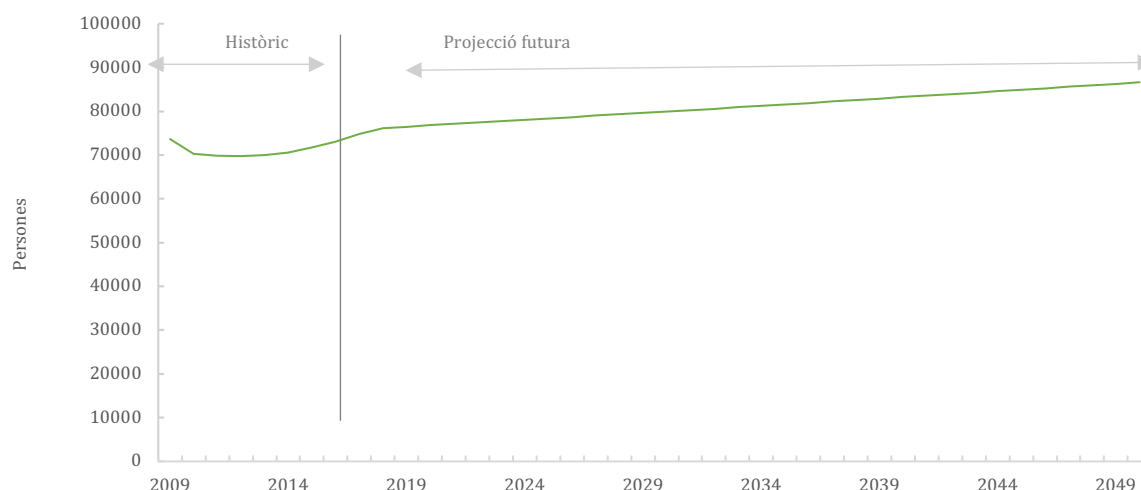


Figura 5.10. Dades històriques i evolució futura de la població d'Andorra Font: Departament d'estadística d'Andorra ([www.estadistica.ad](http://www.estadistica.ad))

D'altra banda, en aquest escenari també es considera una evolució dels usos del sòl de cara a l'horitzó 2050 combinat amb el canvi climàtic t2p0 (equivalent a un RCP 4.5 pel 2050). En aquest escenari es donarà una colonització del bosc en zones de pastura i matolls en alçada i de les zones de matolls en les vessants (escenari AFOR). Pel que fa a l'impacte del creixement urbanístic, la superfície urbana suposa en l'actualitat un 8 % del total respecte els altres tipus de sòl (bosc, prats, roquissars, entre altres). El creixement urbanístic que suposarà pel que fa al canvi de la superfície de sòl el 2050 amb les tendències actuals té un efecte marginal en l'impacte del canvi d'ús del sòl en el model hidrològic i per tant, s'ha obviat en la generació d'escenaris d'usos del sòl. No obstant, aquest creixement urbanístic sí que es veu reflectit en el creixement poblacional i per conseqüència en la projecció de consum domèstic.

#### 5.5.5.2. Escenari de Decreixement

L'escenari de decreixement considera que la població i el turisme decreixen un 10 % i un 30 % respectivament a l'horitzó 2050.

Pel que fa a les dades de turisme, no existeixen previsions de com evolucionarà el turisme en els pròxims anys amb l'afegit de la incertesa que la crisi de la COVID-19 ha traslladat en la possible evolució futura de les dinàmiques del turisme a Andorra i internacionals. Per aquest escenari de decreixement s'ha assumit una disminució del 30

% del nombre d'hotels basat en una possible analogia de la reducció durant alguns mesos de reactivació després de la primera onada de la COVID-19. Aquest escenari de decreixement pot simular dos possibles tendències oposades però amb un resultat semblant. Per una banda, un decreixement degut a una crisi socioeconòmica derivada dels impactes de la COVID-19 i especialment en la reducció de la mobilitat turística, la caiguda del pes del turisme i de la població que és sustentat d'aquest sector i derivats. L'altra hipòtesi és la d'un decreixement buscat derivat d'una planificació d'un model socioeconòmic de més valor afegit i de major sostenibilitat. Aquesta hipòtesi podria estar basada sobre la capacitat de desprioritzar un turisme de masses i diversificar-lo cap a un turisme de menor volum i intensitat però amb un retorn i valor econòmic i ambiental. També en el desenvolupament de nous sectors més basats en el coneixement i les noves tecnologies que agafin més preponderància i redueixin el pes dels sectors relacionats amb el turisme i el comerç. De la mateixa manera, aquest escenari es traslladaria amb una disminució de la població, especialment d'aquells treballadors temporers i de curta permanència al país associats als llocs de treball derivats del turisme i del comerç de masses.

#### **5.5.5.3. Escenari de futur creixement de la producció de neu artificial**

L'escenari de futur creixement de la producció de neu artificial preveu un augment de la producció de neu artificial degut a la falta d'innivació natural causada pel canvi climàtic. Es considera una previsió d'augment de la producció de neu, especialment a l'inici i a mitjans de temporada del 25 % i en conseqüència del consum d'aigua (Pons, 2014).

Aquest escenari d'afectació del canvi climàtic a mig termini sobre la neu i les estacions no afectarà de forma homogènia a tot el Pirineu. Degut a la heterogeneïtat climàtica i especialment geogràfica, algunes regions del Pirineu es presenten més vulnerables que d'altres. En aquest context, Andorra ha estat identificada com a una zona més resilient que les seves zones veïnes del Pirineu pel que es projecta una possible captació de nous esquiadors d'aquestes zones més vulnerables (Pons, 2014). Per aquest motiu, aquest escenari també preveu un augment del 15 % de la freqüentació turística a l'horitzó 2050.

Pel que fa a la població, per aquest escenari s'aplica la tendència de la darrera dècada en la taxa de creixement de la mateixa manera que en l'escenari de referència o BAU.

#### **5.5.5.4. Escenari Eficient**

Aquest escenari es basa en la consciència mediambiental, la responsabilitat social i l'aplicació de mesures tant tècniques i tecnològiques com de comportament per a una millora de l'eficiència en la gestió, distribució i consum del recurs hídric. L'escenari va en la línia de fomentar tant l'estalvi d'aigua com l'eficiència del seu ús tant per al consum domèstic com per al consum en els hotels amb la finalitat de reduir la pressió sobre el recurs hídric i així disposar de suficient recurs per a les diferents demandes. Aquest escenari pretén simular una reducció del consum per habitant i per turista assumint la tendència actual de creixement.

Diversos estudis realitzats al Regne Unit i als Estats Units informen que, de mitjana, aplicar dissenys i productes eficients en els edificis domèstics per a l'estalvi d'aigua comporta una disminució del consum del 15 % (Adeyeye i Church, 2012). Per tant, considerarem una disminució del consum domèstic del 15 % a l'horitzó 2050, el que suposa una disminució del 0,43 % anual. Les estratègies d'intervenció en l'eficiència de l'aigua inclouen eines d'informació com fulletons adherits a les factures de l'aigua, intervencions tecnològiques (productes eficients per disminuir el consum d'aigua, horaris per a dutxar-se o mesures d'adaptació de les aixetes i dutxes per a disminuir el consum, instal·lació de comptadors d'aigua o solucions tecnològiques com ara sistemes de captació de l'aigua de pluja o les aigües residuals) (Adeyeye i Church, 2012).

L'estudi demostra que les innovacions físiques i tècniques per si soles impliquen canvis de comportament perquè els individus necessiten acceptar, entendre, comprar i utilitzar adequadament (Steg i Vlek, 2009). També es demostra que les intervencions eficients haurien d'incloure l'usuari en el procés actiu i continu per a les decisions (Keller, Goyette i Beniston, 2005). Les estratègies han de promoure la transparència, actuant sobre la informació i les decisions de totes les parts implicades (Larson, 2010).

D'altra banda, l'estudi de Barnard, Darkins, Earl i Adeyeye (2014) mostra una reducció del 24 % del consum d'aigua a l'hotel després d'aplicar mesures que permeten disminuir el consum d'aigua com poden ser accessoris per a aixetes i dutxes a través d'un estudi de cas realitzat en un hotel de talla mitjana a Anglaterra. En aquest cas s'aplicarà aquesta reducció de consum a l'horitzó 2050 que implicarà una disminució del 0,7 % anual.

La població seguirà la taxa de creixement sense canvis utilitzada a l'escenari de referència o BAU.

Per aquest escenari també es preveu un canvi en els usos del sòl que preveu una variació en l'estructura forestal degut a la implementació més activa de mesures de gestió del bosc (escenari MANAGEFOR combinat amb climàtic t2p0). Es planifica la neteja i desbrossat de boscos densos insalubres o la realització de cremes prescrites per afavorir la regeneració i successió dels ecosistemes forestals. L'escenari es fixa un objectiu de gestionar el 50 % de la superfície forestal actual de les capçaleres actuant primer en els boscos més densos. Aquestes mesures permeten millorar la salut ecosistèmica dels boscos, reduir els riscos naturals associats, com poden ser els incendis i les avingudes, alhora que tal i com s'ha identificat amb el model hidrològic RHESys, mitigar parcialment els efectes del canvi climàtic sobre la disminució del recurs hídric.

#### 5.5.5.5. Escenaris climàtics

Cada escenari anterior es combinarà amb els escenaris climàtics t2p0, t2p-20, t4p0, t2p20 i t4p-20. Els escenaris t2p0, t2p-20 i t2p20 preveuen un augment de la temperatura mitjana anual de 2°C per al 2050 i una disminució o augment del 20 % de la precipitació. Els escenaris t4p0 i t4p-20 preveuen un augment de la temperatura de 4 °C i una disminució de la precipitació del 20 % considerant-se aquest últim l'escenari climàtic més extrem a l'horitzó 2050. Els escenaris t2p0, t2p-20, t4p0,i t4p-20 implicaran una disminució del cabal del 9 %, 36 %, 14 % i 40,5 % i l'escenari t2p20 implicarà un augment del cabal del 24 % (Taula 5.6).

De la mateixa manera, l'estudi de Reynaud, Pons i Pesado (2018) estima que davant un augment de la temperatura mitjana d'un 10 %, les llars andorranes augmentaran el consum d'aigua al voltant d'un 5,9 % a un 7,8 % (mitjana de 6,85 %). Si considerem una

temperatura mitjana anual respecte el període 1950-2015 calculat a partir de les dades de FEDA (Engolasters, Central i Ransol) de 7,9 °C i l'escenari climàtic d'un augment de la temperatura de 2 °C el 2050, això implicarà un increment de la temperatura mitjana anual de 9,9 °C el 2050 que representarà un augment del 25 %. Per tant, si la temperatura augmenta un 25 % el 2050, podem estimar que hi haurà un augment del consum domèstic del 17,1 % (0,49 % anual). Si tenim en compte un augment de la temperatura de 4 °C el 2050 això implicarà un augment del consum domèstic del 34,7 % (3,5 % anual). Aplicarem aquest rati a tots els escenaris que preveuen un augment de la temperatura de 2 °C i 4 °C el 2050.

### **5.5.6. Resultats del model WEAP-Andorra**

En aquesta secció s'exploren els principals resultats de la projecció futura de la demanda d'aigua a Andorra i del recurs hídric disponible a l'horitzó 2050 per als diferents escenaris anteriorment descrits i per a cadascuna de les tres conques: Gran Valira, Valira del Nord i Valira d'Orient (veure Taula 5.9, 5.10 i 5.11).

#### **5.5.6.1. Conca Gran Valira**

##### **5.5.6.1.1. Escenari de referència**

L'escenari de referència (Figura 5.11) per al riu Gran Valira projecta que la demanda d'aigua anual augmenti un 18,96 % a l'horitzó 2049-2050 respecte la demanda del 2015-2016 de 3,10 Mm<sup>3</sup> a 3,69 Mm<sup>3</sup>. Quan s'aplica l'escenari de referència combinat amb els diferents escenaris de canvi climàtic la demanda d'aigua augmenta un 18,96 % quan la temperatura augmenta 2 °C i un 147,7 % quan la temperatura augmenta 4 °C passant a 3,69 Mm<sup>3</sup> i 7,69 Mm<sup>3</sup> respectivament.

Pel que fa al cabal del Gran Valira aquest variarà igual per a tots els escenaris socioeconòmics. Segons els diferents escenaris de canvi climàtic i tenint en compte els cabals ecològics i la màxima capacitat d'extracció es passarà de 99 Mm<sup>3</sup> el 2015-2016 a 90 Mm<sup>3</sup>, 63 Mm<sup>3</sup>, 85 Mm<sup>3</sup>, 123 Mm<sup>3</sup>, 59 Mm<sup>3</sup>, 91 Mm<sup>3</sup> i 96 Mm<sup>3</sup> respectivament segons els escenaris climàtics t2p0, t2p-20, t4p0, t2p20, t4p-20, AFOR + t2p0 i MANAGEFOR+ t2p0 (taula 5.9).



Per al conjunt d'escenaris de referència les demandes es podran satisfer sense cap tipus de conflicte disposant de suficient recurs hídric quan la temperatura augmenta 2 °C com 4 °C (Figura 5.11 i 5.12).

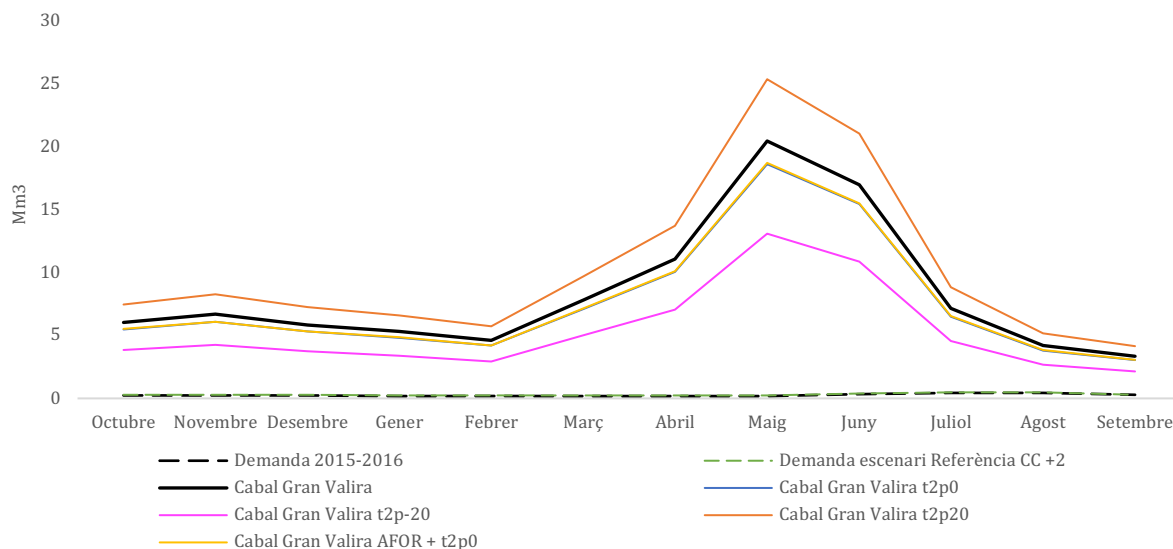


Figura 5.11. Resultats de l'escenari de referència combinat amb els escenaris de canvi climàtic t2p0, t2p-20, t2p20 i escenari d'usos del sòl AFOR + t2p0 i aplicant els cabals ecològics i la capacitat màxima d'extracció d'aigua per l'horitzó 2049-2050 comparat amb la demanda del 2015-2016 i el cabal del Gran Valira. Font: Elaboració pròpia

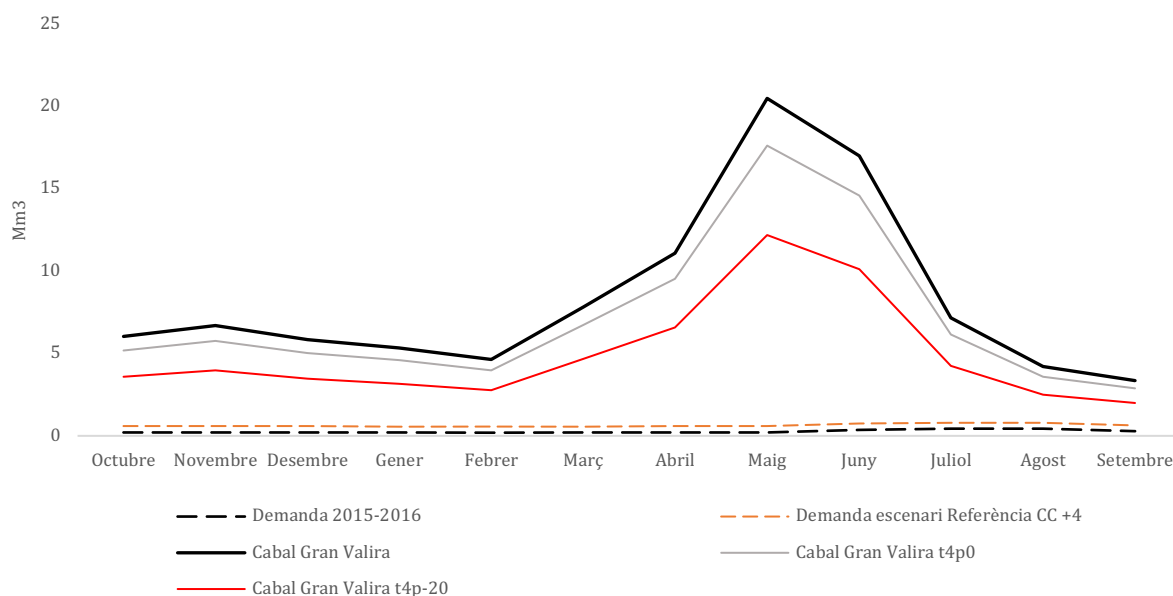


Figura 5.12. Resultats de l'escenari de referència combinat amb els escenaris de canvi climàtic t4p0 i t4p-20 aplicant els cabals ecològics i la capacitat màxima d'extracció d'aigua per l'horitzó 2049-2050 comparat amb la demanda del 2015-2016 i el cabal del Gran Valira. Font: Elaboració pròpia

### 5.5.6.1.2. Escenari de decreixement

L'escenari de decreixement (Figura 5.13 i 5.14) per al riu Gran Valira projecta que la demanda d'aigua anual disminueixi un 7,89 % a l'horitzó 2049-2050 respecte la demanda del 2015-2016 de 3,10 Mm<sup>3</sup> a 2,86 Mm<sup>3</sup>. Quan s'aplica l'escenari de decreixement combinat amb els diferents escenaris de canvi climàtic, la demanda d'aigua augmenta un 0,96 % (3,13 Mm<sup>3</sup>) quan la temperatura augmenta 2 °C i un 102,2 % (6,28 Mm<sup>3</sup>) quan la temperatura augmenta 4 °C (taula 5.9).

L'escenari de decreixement permetrà disposar de suficient recurs, per tant, tampoc existirà una situació crítica i les demandes es podran satisfer sense problemes.

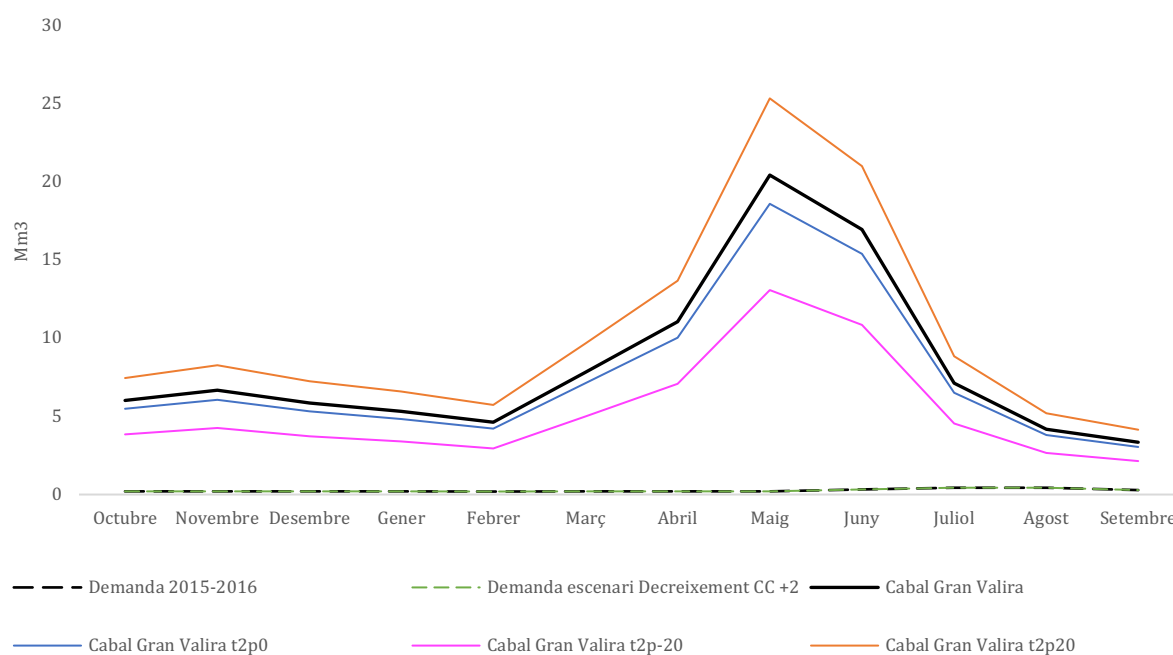


Figura 5.13. Resultats de l'escenari de decreixement combinat amb els escenaris de canvi climàtic t2p0, t2p-20 i t2p20 aplicant els cabals ecològics i la capacitat màxima d'extracció d'aigua per l'horitzó 2049-2050 comparat amb la demanda del 2015-2016 i el cabal del Gran Valira. Font: Elaboració pròpia

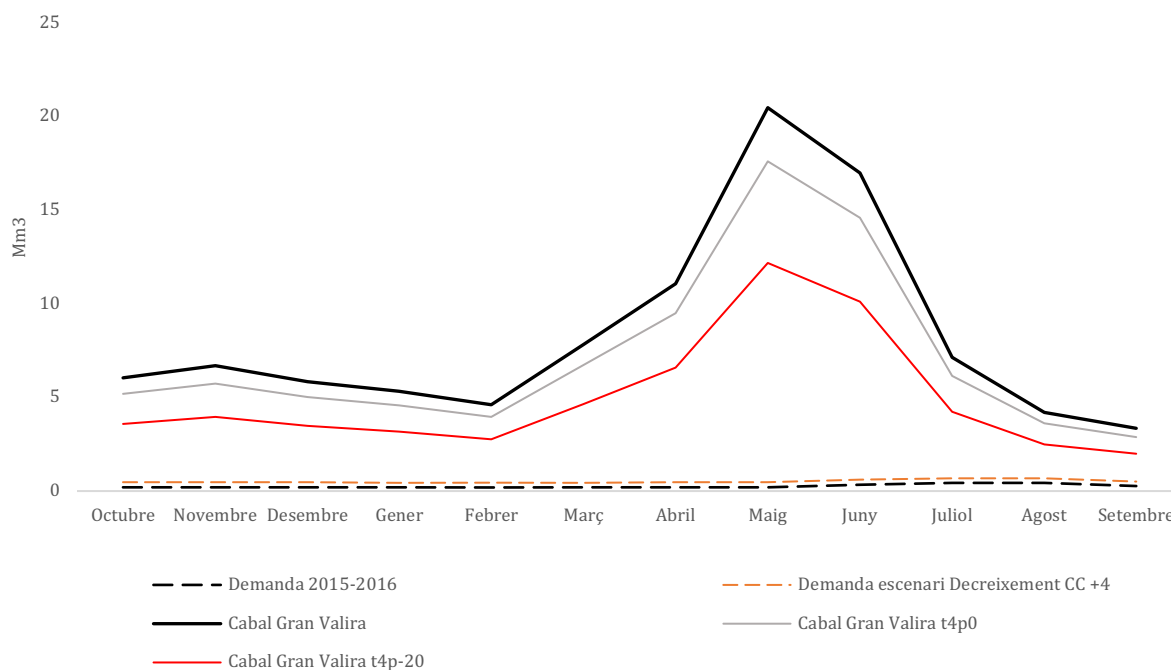


Figura 5.14. Resultats de l'escenari de decreixement combinat amb els escenaris de canvi climàtic t4p0 i t4p-20 i aplicant els cabals ecològics i la capacitat màxima d'extracció d'aigua per l'horitzó 2049-2050 comparat amb la demanda del 2015-2016 i el cabal del Gran Valira. Font: Elaboració pròpia

#### 5.5.6.1.3. Escenari de futur creixement de la producció de neu artificial

Quan la producció de neu artificial augmenta s'observa un augment de la demanda d'aigua però sense provocar una situació crítica a l'horitzó 2050 (Figura 5.15 i 5.16). La demanda d'aigua anual augmentarà un 9,4 % a l'horitzó 2049-2050 respecte la demanda del 2015-2016 de 3,10 Mm<sup>3</sup> a 3,4 Mm<sup>3</sup>. Quan es combinen amb els diferents escenaris de canvi climàtic la demanda d'aigua augmenta un 20,6 % (3,74 Mm<sup>3</sup>) quan la temperatura augmenta 2 °C i un 149,4 % (7,74 Mm<sup>3</sup>) quan la temperatura augmenta 4 °C (taula 5.9).

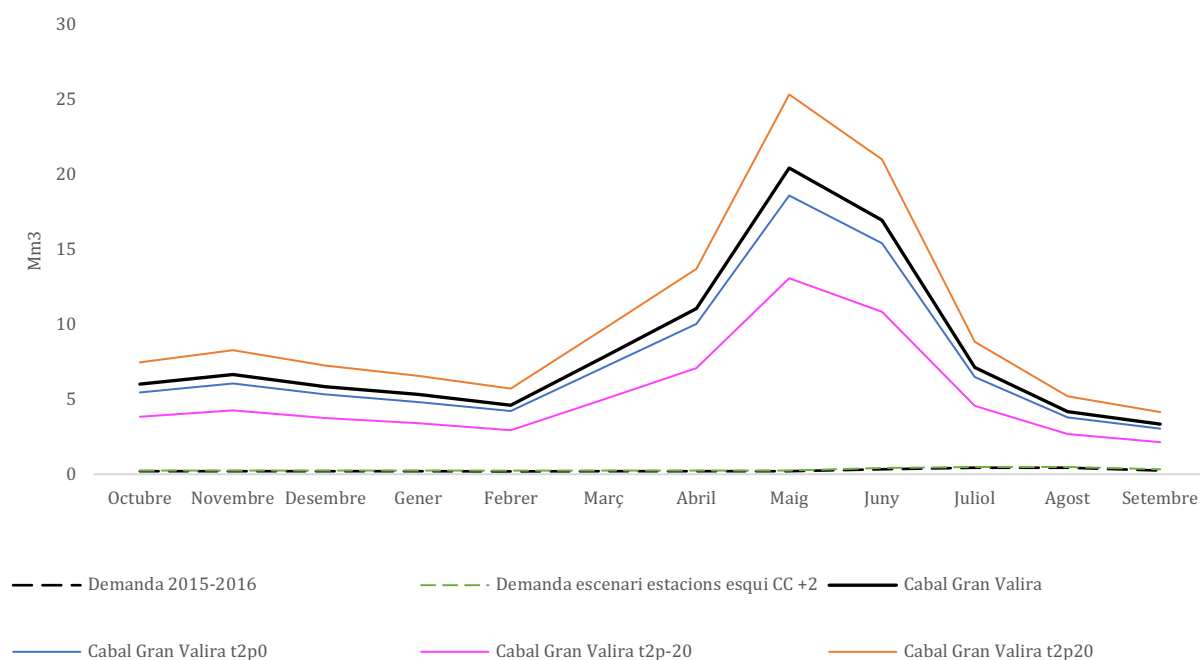


Figura 5.15. Resultats de l'escenari de futur creixement de la producció de neu artificial combinat amb els escenaris de canvi climàtic t2p0, t2p-20 i t2p20 i aplicant els cabals ecològics i la capacitat màxima d'extracció d'aigua per l'horitzó 2049-2050 comparat amb la demanda del 2015-2016 i el cabal del Gran Valira. Font: Elaboració pròpia

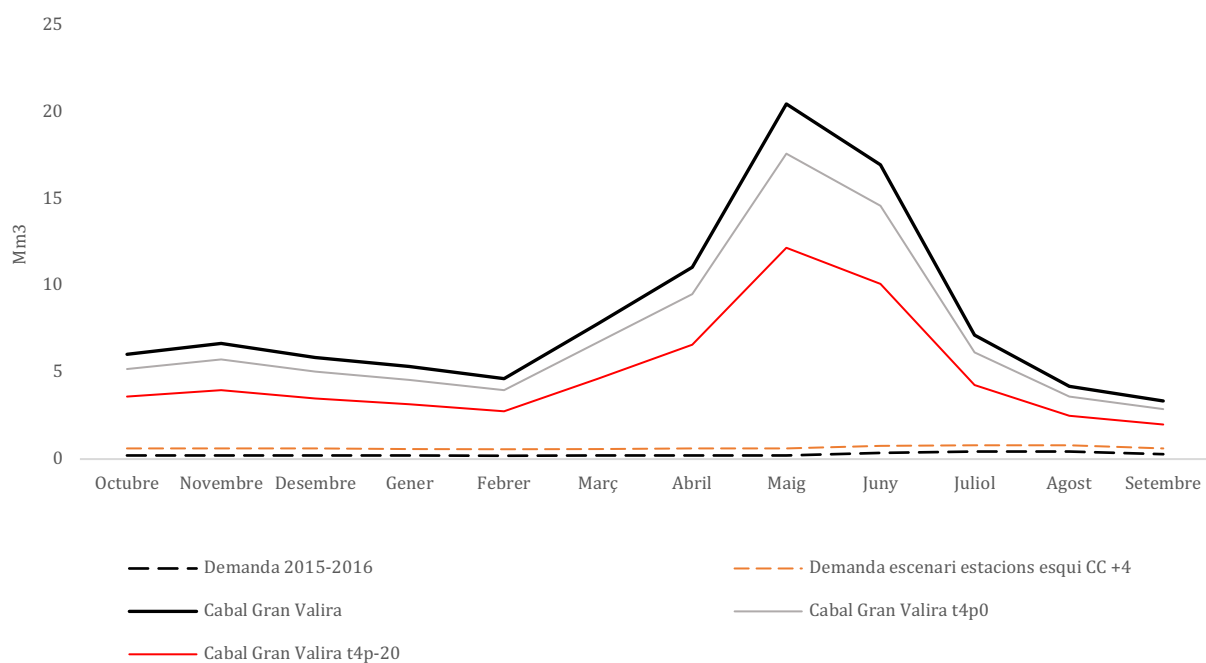


Figura 5.16. Resultats de l'escenari de futur creixement de la producció de neu artificial combinat amb els escenaris de canvi climàtic t4p0 i t4p-20 i aplicant els cabals ecològics i la capacitat màxima d'extracció d'aigua per l'horitzó 2049-2050 comparat amb la demanda del 2015-2016 i el cabal del Gran Valira. Font: Elaboració pròpia

#### 5.5.6.1.4. Escenari eficient

Quan es té en compte un escenari eficient amb la implementació de mesures per reduir el consum d'aigua s'observa que la demanda d'aigua anual augmentarà un 6,77 % a l'horitzó 2049-2050 respecte la demanda del 2015-2016 de 3,10 Mm<sup>3</sup> a 3,32 Mm<sup>3</sup> tenint en compte l'escenari d'usos del sòl MANAGEFOR que preveu una disminució del cabal de 3,95 % i un augment de la temperatura de 2 °C. Quan s'aplica l'escenari eficient combinat amb els diferents escenaris de canvi climàtic la demanda d'aigua augmenta un 6,7 % (3,32 Mm<sup>3</sup>) quan la temperatura augmenta 2 °C i un 118,5 % (6,78 Mm<sup>3</sup>) quan la temperatura augmenta 4 °C (taula 5.9).

L'escenari eficient permetrà igualment disposar de suficient recurs, per tant, tampoc existirà una situació crítica i les demandes es podran satisfer (Figura 5.17 i 5.18).

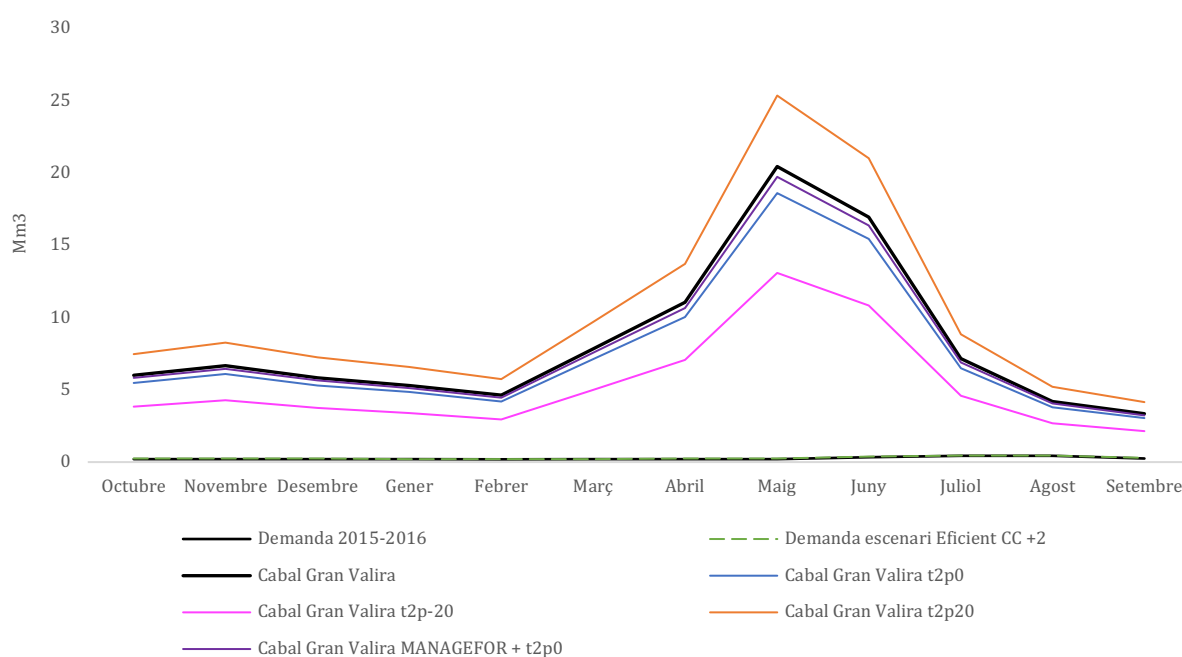


Figura 5.17. Resultats de l'escenari eficient combinat amb els escenaris de canvi climàtic t2p0, t2p-20, t2p20 i l'escenari d'usos del sòl MANAGEFOR + t2p0 aplicant els cabals ecològics i la capacitat màxima d'extracció d'aigua per l'horitzó 2049-2050 comparat amb la demanda del 2015-2016 i el cabal del Gran Valira. Font: Elaboració pròpia

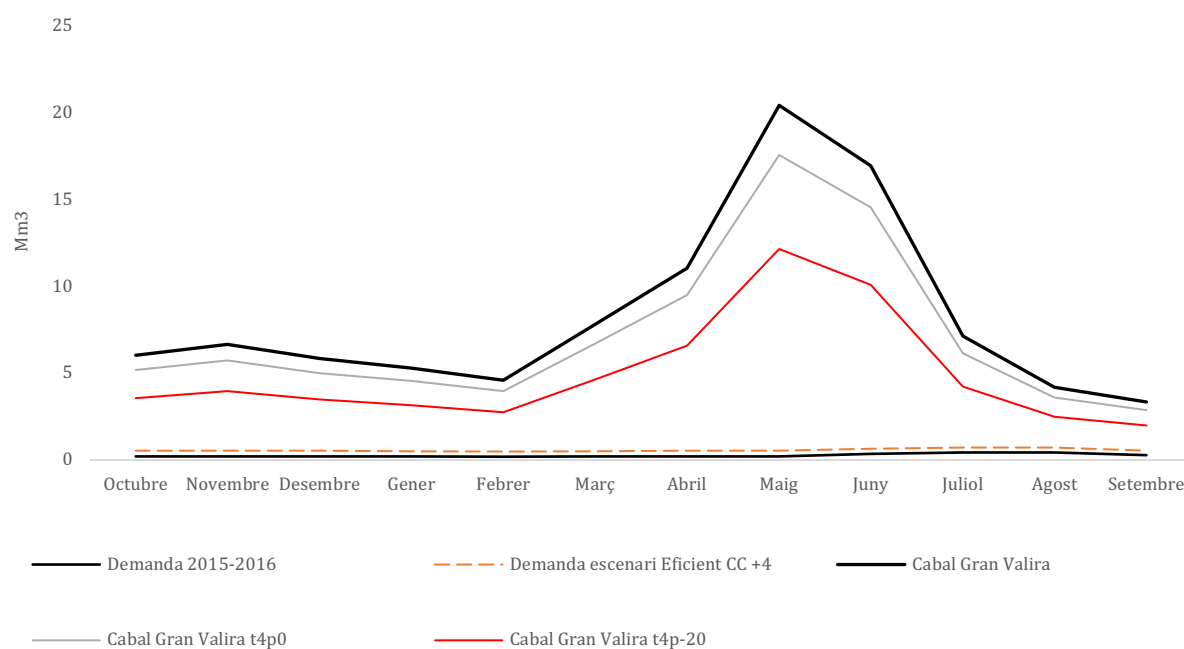


Figura 5.18. Resultats de l'escenari eficient combinat amb els escenaris de canvi climàtic t4p0 i t4p-20 i aplicant els cabals ecològics i la capacitat màxima d'extracció d'aigua per l'horitzó 2049-2050 comparat amb la demanda del 2015-2016 i el cabal del Gran Valira. Font: Elaboració pròpia

		Octubre	Novembre	Desembre	Gener	Febrer	Març	Abril	Maig	Juny	Juliol	Agost	Setembre	Total	Variació
2015-2016	Demanda 2015-2016	0,21	0,21	0,21	0,19	0,19	0,19	0,21	0,21	0,34	0,44	0,44	0,27	3,10	
	Demanda escenari Decreixement	0,19	0,19	0,19	0,17	0,17	0,17	0,19	0,19	0,32	0,41	0,41	0,25	2,86	-7,89
	Demanda escenari Decreixement CC +2	0,22	0,22	0,22	0,19	0,19	0,19	0,21	0,21	0,35	0,44	0,44	0,27	3,13	0,96
	Demanda escenari Decreixement CC +4	0,49	0,49	0,49	0,45	0,45	0,45	0,49	0,49	0,62	0,68	0,68	0,51	6,28	102,27
	Demanda escenari Eficient	0,23	0,23	0,23	0,21	0,21	0,21	0,23	0,23	0,36	0,45	0,45	0,28	3,32	6,77
	Demanda escenari Eficient CC +2	0,23	0,23	0,23	0,21	0,21	0,21	0,23	0,23	0,36	0,45	0,45	0,28	3,32	6,77
	Demanda escenari Eficient CC +4	0,53	0,53	0,53	0,49	0,49	0,49	0,53	0,53	0,67	0,72	0,72	0,55	6,78	118,45
2049-2050	Demanda escenari estacions esquí CC +2	0,27	0,27	0,27	0,24	0,24	0,24	0,26	0,26	0,40	0,49	0,49	0,32	3,74	20,61
	Demanda escenari estacions esquí CC +4	0,61	0,61	0,61	0,57	0,57	0,57	0,62	0,62	0,75	0,80	0,80	0,63	7,74	149,36
	Demanda escenari estacions esquí	0,24	0,24	0,24	0,21	0,21	0,21	0,23	0,23	0,37	0,46	0,46	0,29	3,40	9,37
	Demanda escenari Referència	0,26	0,26	0,26	0,24	0,24	0,24	0,26	0,26	0,40	0,48	0,48	0,31	3,69	18,96
	Demanda escenari Referència CC +4	0,61	0,61	0,61	0,56	0,56	0,56	0,61	0,61	0,75	0,79	0,79	0,62	7,69	147,71
	Demanda escenari Referència CC +2	0,26	0,26	0,26	0,24	0,24	0,24	0,26	0,26	0,40	0,48	0,48	0,31	3,69	18,96
2015-2016	Cabal Gran Valira	6,02	6,67	5,84	5,31	4,62	7,81	11,05	20,45	16,95	7,14	4,18	3,35	99,38	
	Cabal Gran Valira t2p0	5,48	6,07	5,31	4,84	4,20	7,11	10,06	18,61	15,42	6,49	3,81	3,05	90,44	
2049-2050	Cabal Gran Valira t2p-20	3,85	4,27	3,74	3,40	2,95	5,00	7,07	13,09	10,85	4,57	2,68	2,14	63,61	
	Cabal Gran Valira t4p0	5,18	5,74	5,02	4,57	3,97	6,72	9,50	17,58	14,58	6,14	3,60	2,88	85,47	
	Cabal Gran Valira t2p20	7,47	8,27	7,24	6,59	5,72	9,69	13,70	25,35	21,02	8,85	5,19	4,15	123,24	
	Cabal Gran Valira t4p-20	3,58	3,97	3,47	3,16	2,75	4,65	6,58	12,17	10,08	4,25	2,49	1,99	59,13	
	Cabal Gran Valira AFOR + t2p0 (	5,51	6,11	5,34	4,86	4,22	7,15	10,11	18,71	15,51	6,53	3,83	3,06	90,94	
	Cabal Gran Valira MANAGEFOR + t2p0	5,81	6,44	5,63	5,13	4,46	7,54	10,66	19,73	16,36	6,89	4,04	3,23	95,91	

Taula 5.9. Dades de demanda mensuals i de cabal (Mm<sup>3</sup>) segons els escenaris per la Conca Gran Valira i la variació (%) dels escenaris respecte la demanda del 2015-2016. Font: Elaboració pròpia

### 5.5.6.2. Conca Valira Nord

#### 5.5.6.2.1. Escenari de referència

L'escenari de referència per al riu Valira del Nord projecta que la demanda d'aigua anual augmenti un 20,53 % a l'horitzó 2049-2050 respecte la demanda del 2015-2016 de 1,65 Mm<sup>3</sup> a 1,99 Mm<sup>3</sup> considerant la taxa de creixement poblacional i sota l'escenari d'usos del sòl AFOR. Quan s'aplica l'escenari de referència combinat amb els escenaris de canvi climàtic la demanda d'aigua augmenta un 20,53 % (1,99 Mm<sup>3</sup>) quan la temperatura augmenta 2 °C i un 160,1 % (4,29 Mm<sup>3</sup>) quan la temperatura augmenta 4 °C.

Pel cabal del Valira del Nord aquest varia igual per a tots els escenaris socioeconòmics, segons els diferents escenaris de canvi climàtic i usos del sòl considerant els cabals ecològics i la màxima capacitat d'extracció passant de 11 Mm<sup>3</sup> el 2015-2016 a 10 Mm<sup>3</sup>, 7 Mm<sup>3</sup>, 9 Mm<sup>3</sup>, 13 Mm<sup>3</sup>, 6 Mm<sup>3</sup>, 10 Mm<sup>3</sup> i 11 Mm<sup>3</sup> segons els escenaris climàtics t2p0, t2p-20, t4p0, t2p20, t4p-20, AFOR + t2p0 i MANAGEFOR + t2p0 (taula 5.10).

Per l'escenari de referència en el cas de la Conca del Valira del Nord les demandes es podran satisfer sense cap tipus de conflicte disposant de suficient recurs hídric quan la temperatura augmenta 2 °C (figura 5.19).

En canvi, quan es dona un augment de la temperatura de 4 °C existiran situacions durant l'any que poden ser crítiques. Aquests moments de conflicte es donen durant l'estiu, en aquest cas de juliol a setembre i durant el mes de febrer quan el cabal disminueix degut als canvis en el clima (a l'estiu per la majoria d'escenaris climàtics, al febrer únicament amb l'escenari climàtic t4p-20) (figura 5.20). Durant el mes de juliol la demanda d'aigua augmenta de 0,26 Mm<sup>3</sup> (2015-2015) a 0,50 Mm<sup>3</sup>, amb un cabal de 0,48 Mm<sup>3</sup>, per tant, la demanda d'aigua serà superior de 3,9 % del cabal disponible. Durant el mes d'Agost la demanda d'aigua entra en conflicte amb diferents escenaris de canvi climàtic, quan es dona l'escenari t4p-20 que implica una disminució del cabal del 40,5 % a l'horitzó 2050 i aquesta demanda continuarà essent de 0,50 Mm<sup>3</sup>, però en canvi el cabal disminuirà a 0,29 Mm<sup>3</sup> amb una demanda d'aigua superior del 71,9 %. Durant aquest mes la disminució del cabal del 14 % (t4p0) que equival a 0,42 Mm<sup>3</sup> també crearà un conflicte



amb una demanda d'aigua superior de 18,9 %. Durant el mes de setembre, hi hauran conflictes amb una disminució de cabal pels mateixos escenaris que durant el mes d'agost. La demanda d'aigua projectada a l'horitzó 2050 serà de 0,38 Mm<sup>3</sup>, el cabal serà de 0,23 Mm<sup>3</sup> i 0,33 Mm<sup>3</sup> per l'escenari t4p-20 i t4p0 respectivament. La demanda serà superior de 67,4 % (t4p-20) i 15,8 % (t4p0). Durant el mes de febrer, la demanda serà superior al cabal únicament per l'escenari de disminució de cabal del 40,5 % (t4p-20), el cabal serà de 0,31 Mm<sup>3</sup> i la demanda de 0,33 Mm<sup>3</sup> sent superior d'un 8,3 % (taula 5.10).

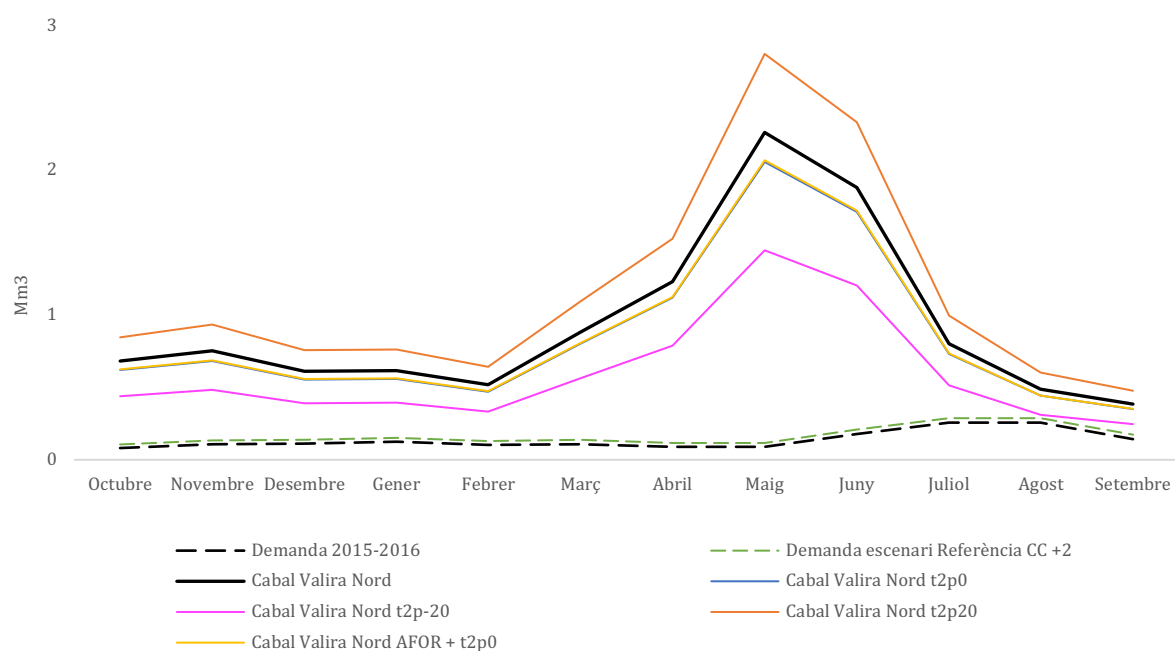


Figura 5.19. Resultats de l'escenari de referència combinat amb els escenaris de canvi climàtic t2p0, t2p-20, t2p20 i l'escenari AFOR + T2P0 aplicant els cabals ecològics i la capacitat màxima d'extracció d'aigua per l'horitzó 2049-2050 comparat amb la demanda del 2015-2016 i el cabal del Valira del Nord. Font: Elaboració pròpia

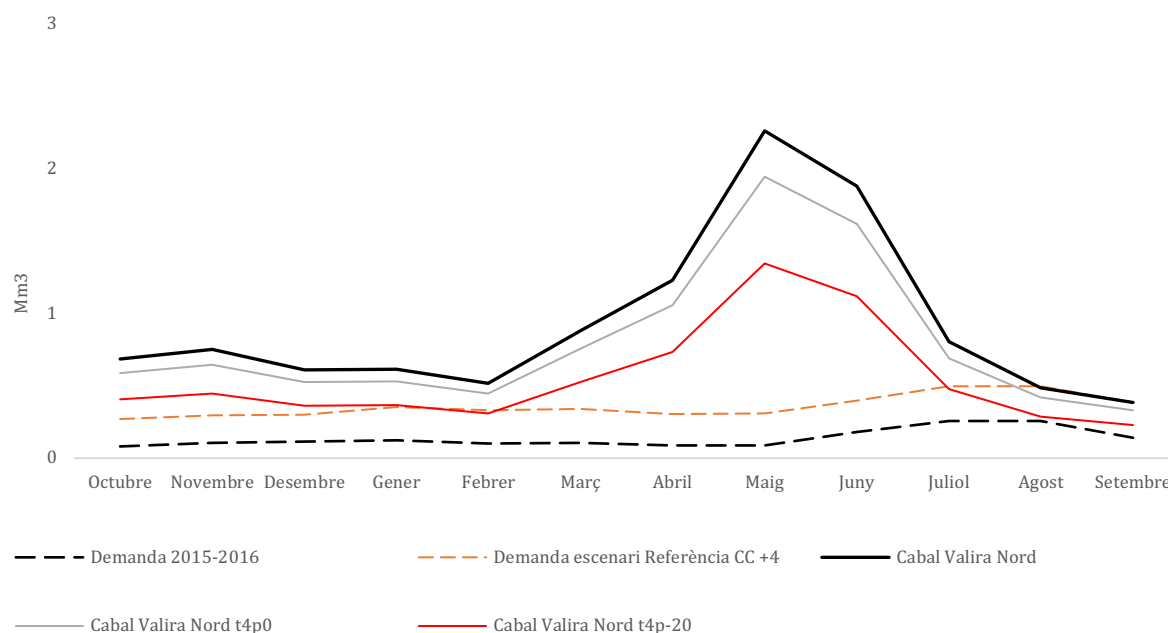


Figura 5.20. Resultats de l'escenari de referència combinat amb els escenaris de canvi climàtic t4p0 i t4p-20 i aplicant els cabals ecològics i la capacitat màxima d'extracció d'aigua per l'horitzó 2049-2050 comparat amb la demanda del 2015-2016 i el cabal del Valira del Nord. Font: Elaboració pròpia

#### 5.5.6.2.2. Escenari de decreixement

L'escenari de decreixement per a la Conca del Valira del Nord projecta que la demanda d'aigua anual disminueixi un 7,82 % a l'horitzó 2049-2050 respecte la demanda del 2015-2016 de 1,65 Mm³ a 1,52 Mm³. Quan s'aplica l'escenari de decreixement combinat amb els diferents escenaris de canvi climàtic la demanda d'aigua augmenta un 1,76 % (1,68 Mm³) quan la temperatura augmenta 2 °C i un 111,6 % (3,49 Mm³) quan la temperatura augmenta 4 °C.

L'escenari de decreixement permetrà disposar de suficient recurs per satisfer les demandes quan la temperatura augmenta 2 °C (figura 5.21).

Quan la temperatura augmenta 4 °C (figura 5.22) existirà una situació crítica i la demanda d'aigua serà superior a l'agost i al setembre quan els cabals disminueixen sota l'escenari climàtic t4p-20. Quan es dona l'escenari t4p0, les demandes seran molt pròximes del cabal durant l'agost i el setembre. Si es considera l'escenari de disminució del cabal del 40,5 % (t4p-20), durant el mes d'agost el cabal serà de 0,29 Mm³ i la

demanda d'aigua de 0,42 Mm<sup>3</sup>, durant el mes de setembre el cabal serà de 0,23 Mm<sup>3</sup> i la demanda d'aigua de 0,31 Mm<sup>3</sup>. Per tant, la demanda d'aigua serà superior de 46,8 % a l'agost i de 35,7 % el mes de setembre (taula 5.10).

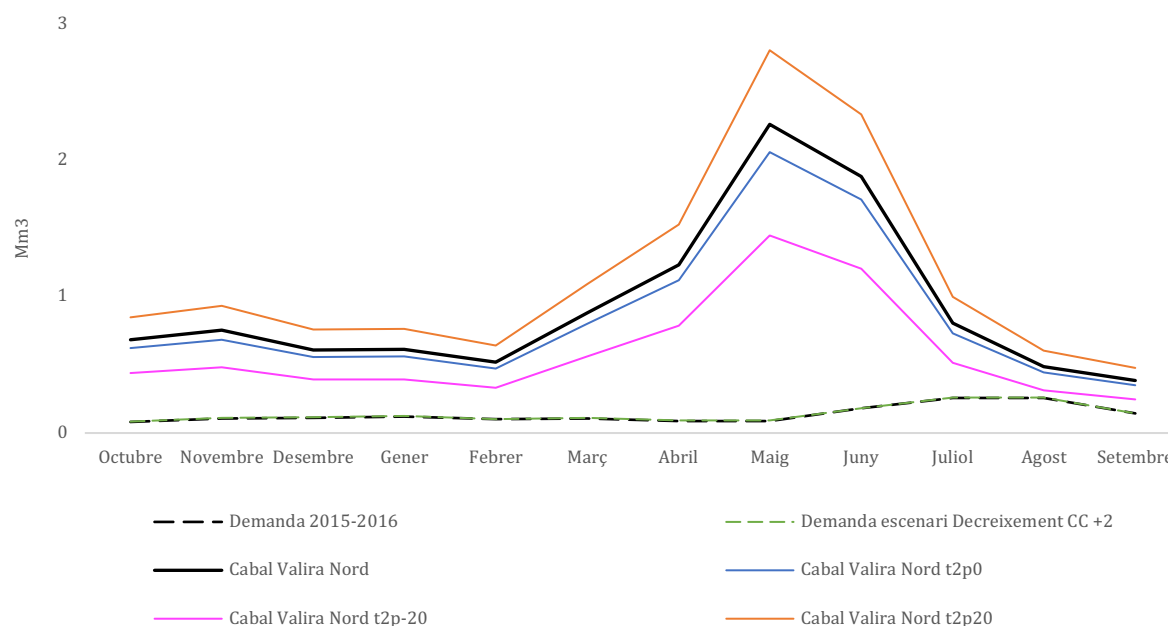


Figura 5.21. Resultats de l'escenari de decreixement combinat amb els escenaris de canvi climàtic t2p0, t2p-20 i t2p20 i aplicant els cabals ecològics i la capacitat màxima d'extracció d'aigua per l'horitzó 2049-2050 comparat amb la demanda del 2015-2016 i el cabal del Valira del Nord. Font: Elaboració pròpia

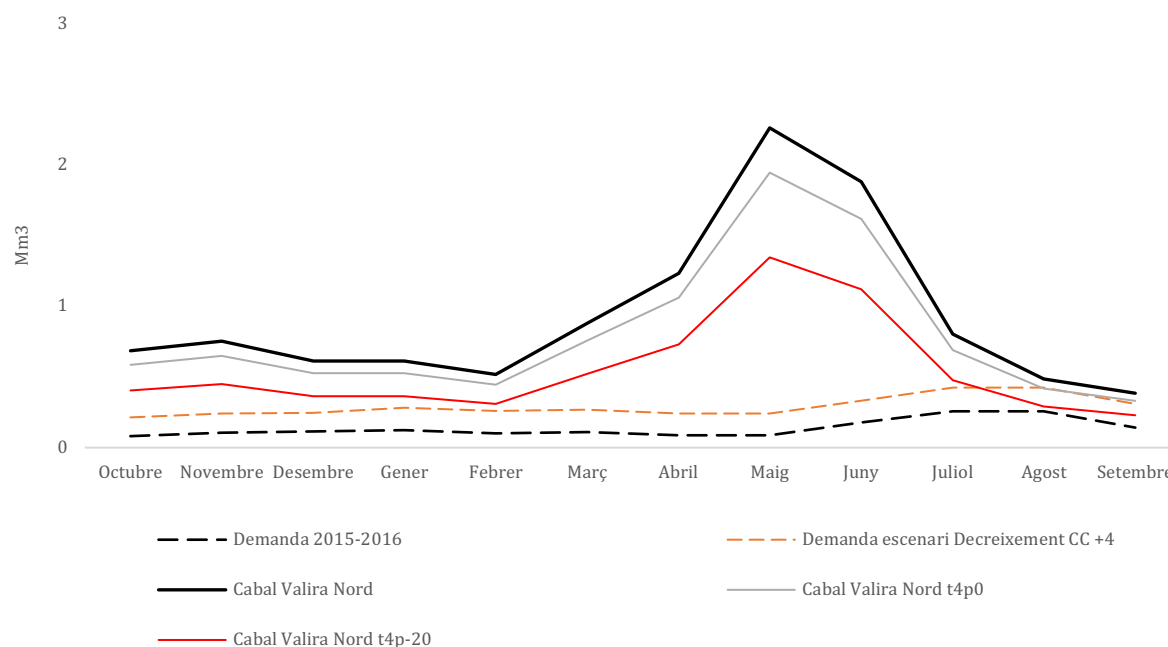


Figura 5.22. Resultats de l'escenari de decreixement combinat amb els escenaris de canvi climàtic t4p0 i t4p-20 i aplicant els cabals ecològics i la capacitat màxima d'extracció d'aigua per l'horitzó 2049-2050 comparat amb la demanda del 2015-2016 i el cabal del Valira del Nord. Font: Elaboració pròpia

### 5.5.6.2.3. Escenari de futur creixement de la producció de neu artificial

Quan la producció de neu artificial augmenta s'observa un augment de la demanda d'aigua però sense provocar una situació crítica a l'horitzó 2050. La demanda d'aigua anual augmentarà un 11,1 % a l'horitzó 2049-2050 respecte la demanda del 2015-2016 de 1,65 Mm<sup>3</sup> a 1,83 Mm<sup>3</sup>. Quan s'aplica l'escenari de futur creixement de la producció de neu artificial combinat amb els diferents escenaris de canvi climàtic la demanda d'aigua augmenta un 23,3 % (2,03 Mm<sup>3</sup>) quan la temperatura augmenta 2 °C i un 162,9 % (4,33 Mm<sup>3</sup>) quan la temperatura augmenta 4 °C.

Quan es considera un augment de la temperatura de 2 °C no existeix cap conflicte entre demanda d'aigua i disponibilitat del recurs hídric (figura 5.23).

Quan en canvi es considera un escenari climàtic d'augment de la temperatura de 4 °C, la demanda d'aigua serà superior al recurs del juliol al setembre quan el cabal disminueix pels escenaris t4p-20 i t4p0. A finals de gener principis de febrer la demanda sobrepassa una mica la disponibilitat de recurs quan el cabal disminueix sota l'escenari t4p-20 (Figura 5.24). El valor de cabal quan aquest disminueix un 40,5 % (t4p-20) és de 0,48 Mm<sup>3</sup> mentre que la demanda d'aigua és de 0,50 Mm<sup>3</sup> el mes de juliol (+ 4,3 %). Durant l'agost, pel mateix escenari el cabal serà de 0,29 Mm<sup>3</sup> i la demanda d'aigua de 0,50 Mm<sup>3</sup> (+ 72 %) mentre que pel mes de setembre el cabal serà de 0,23 Mm<sup>3</sup> i la demanda d'aigua 0,39 Mm<sup>3</sup> (+ 68 %). Quan el cabal disminueix un 14 % (t4p0) aquest serà de 0,42 Mm<sup>3</sup> i la demanda d'aigua de 0,50 Mm<sup>3</sup> (+ 19,3 %) durant el mes d'agost i un valor de cabal de 0,33 Mm<sup>3</sup> i de demanda d'aigua de 0,39 Mm<sup>3</sup> (+ 16,3 %) durant el setembre.

Es només durant l'escenari de disminució del cabal del 40,5 % (t4p-20) que la demanda d'aigua entra en conflicte amb el cabal durant el mes de febrer amb un valor de cabal de 0,31 Mm<sup>3</sup> i una demanda d'aigua de 0,34 Mm<sup>3</sup> (+ 9,2 %) (taula 5.10).

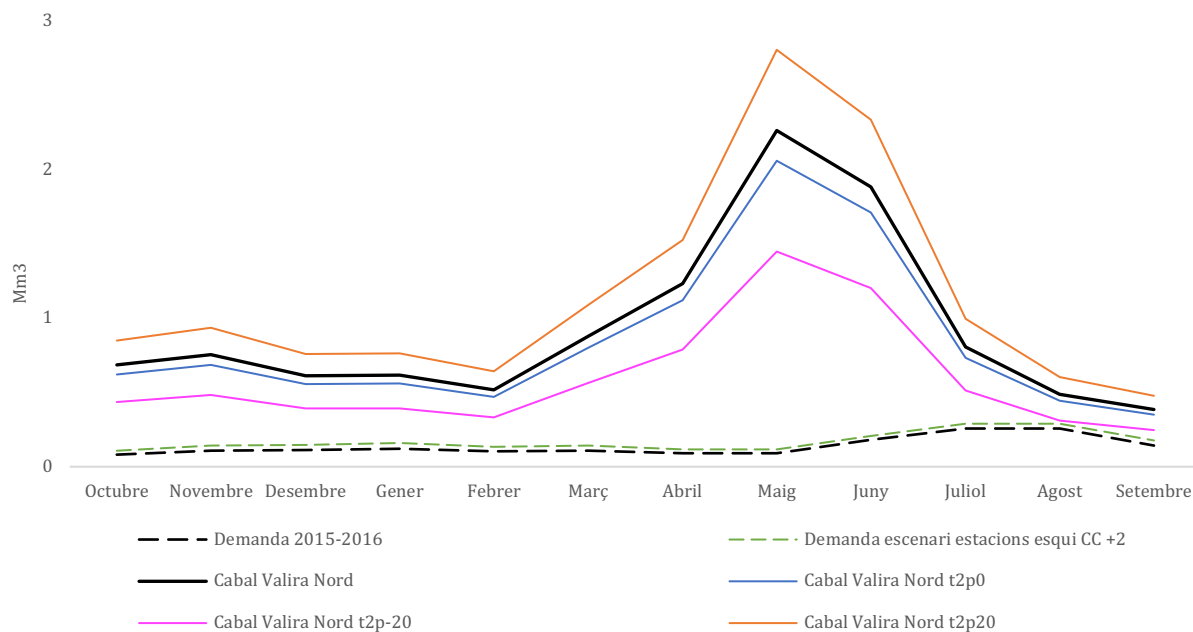


Figura 5.23. Resultats de l'escenari de futur creixement de la producció de neu artificial combinat amb els escenaris de canvi climàtic t2p0, t2p-20 i t2p20 i aplicant els cabals ecològics i la capacitat màxima d'extracció d'aigua per l'horitzó 2049-2050 comparat amb la demanda del 2015-2016 i el cabal del Valira del Nord. Font: Elaboració pròpia

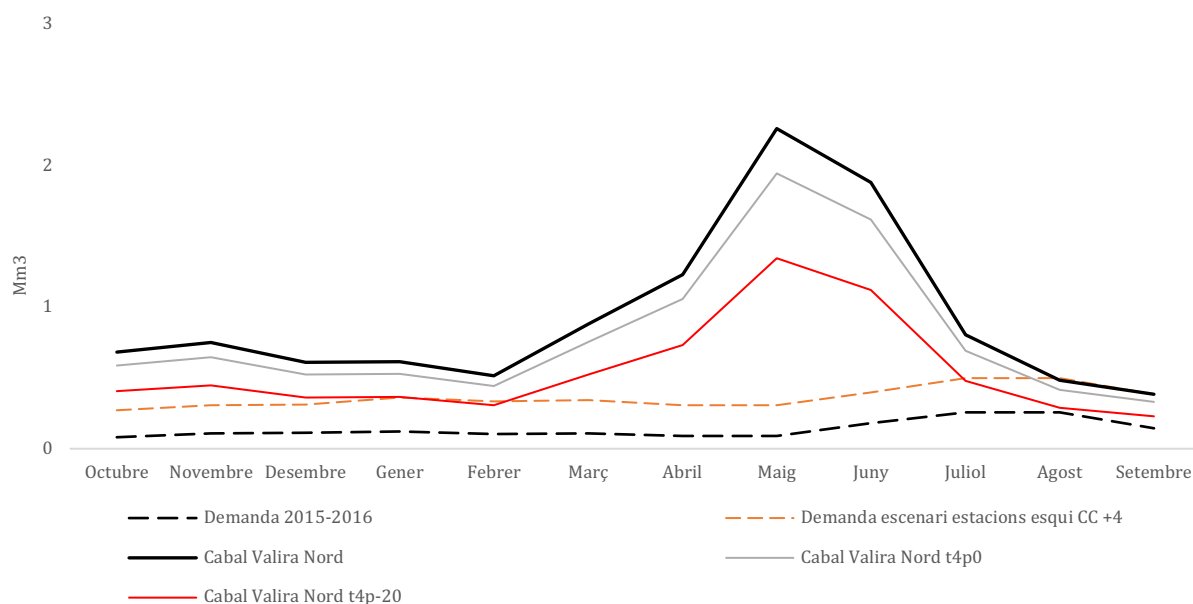


Figura 5.24. Resultats de l'escenari de futur creixement de la producció de neu artificial combinat amb els escenaris de canvi climàtic t4p0 i t4p-20 i aplicant els cabals ecològics i la capacitat màxima d'extracció d'aigua per l'horitzó 2049-2050 comparat amb la demanda del 2015-2016 i el cabal del Valira del Nord. Font: Elaboració pròpia

#### 5.5.6.2.4. Escenari eficient

Quan es té en compte un escenari eficient amb la implementació de mesures per reduir el consum d'aigua s'observa que la demanda d'aigua anual augmentarà un 7,93 % a l'horitzó 2049-2050 respecte la demanda del 2015-2016 de 1,65 Mm<sup>3</sup> a 1,78 Mm<sup>3</sup>. Quan s'aplica l'escenari de referència combinat amb els diferents escenaris de canvi climàtic la demanda d'aigua augmenta un 7,93 % (1,78 Mm<sup>3</sup>) quan la temperatura augmenta 2 °C i un 128,9 % (3,77 Mm<sup>3</sup>) quan la temperatura augmenta 4 °C.

L'escenari eficient permetrà igualment disposar de suficient recurs i les demandes es podran satisfer quan la temperatura augmenta 2 °C (figura 5.25).

Per a l'escenari de canvi climàtic on es dona un augment de la temperatura de 4 °C que disminuirà el cabal sota els escenaris t4p-20 i t4p0 les demandes seran superiors únicament durant l'estiu, els mesos d'agost i setembre. A l'agost, el conflicte es dona amb els dos escenaris climàtics t4p-20 i t4p0 amb valors de cabal de 0,29 Mm<sup>3</sup> i 0,42 Mm<sup>3</sup> respectivament. La demanda aquest mes serà de 0,45 Mm<sup>3</sup> que comportarà una demanda d'aigua superior de 55,9 % i 7,8 % respecte l'escenari t4p-20 i t4p0 respectivament. Durant el mes de setembre el cabal serà de 0,23 Mm<sup>3</sup> (t4p-20) i 0,33 Mm<sup>3</sup> (t4p0) que respecte a la demanda 0,34 Mm<sup>3</sup> aquesta serà superior de 47,1 % i 1,8 % respectivament (taula 5.10).

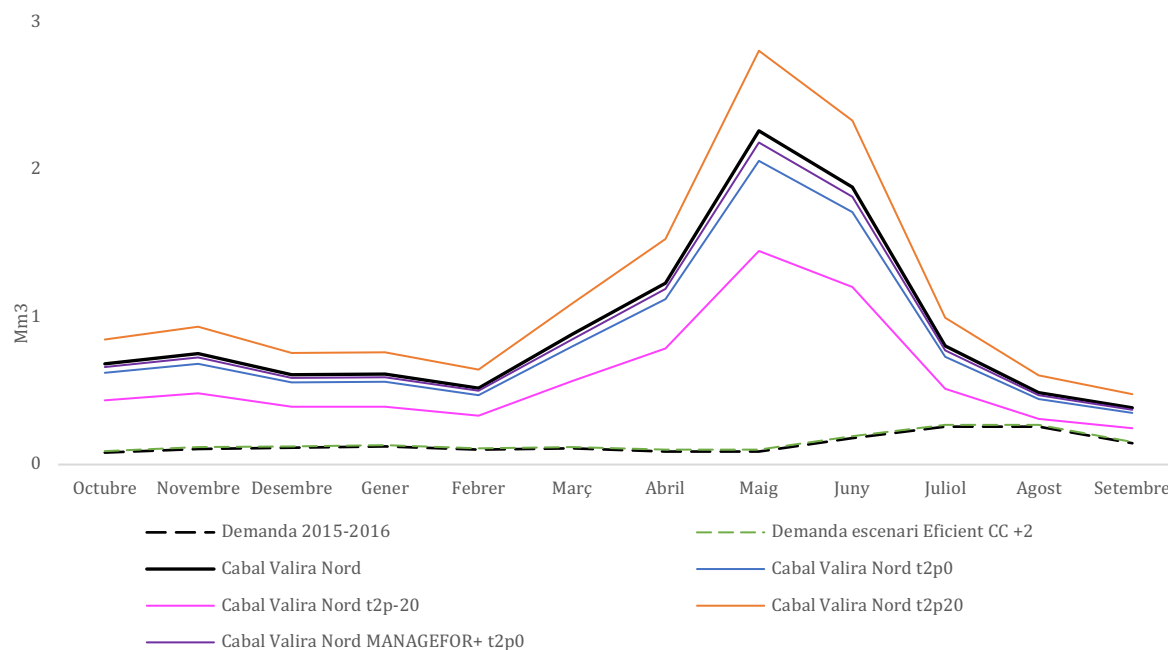


Figura 5.25. Resultats de l'escenari eficient combinat amb els escenaris de canvi climàtic t2p0, t2p-20, t2p20 i l'escenari d'usos del sòl MANAGEFOR + t2p0 aplicant els cabals ecològics i la capacitat màxima d'extracció d'aigua per l'horitzó 2049-2050 comparat amb la demanda del 2015-2016 i el cabal del Valira del Nord. Font: Elaboració pròpia

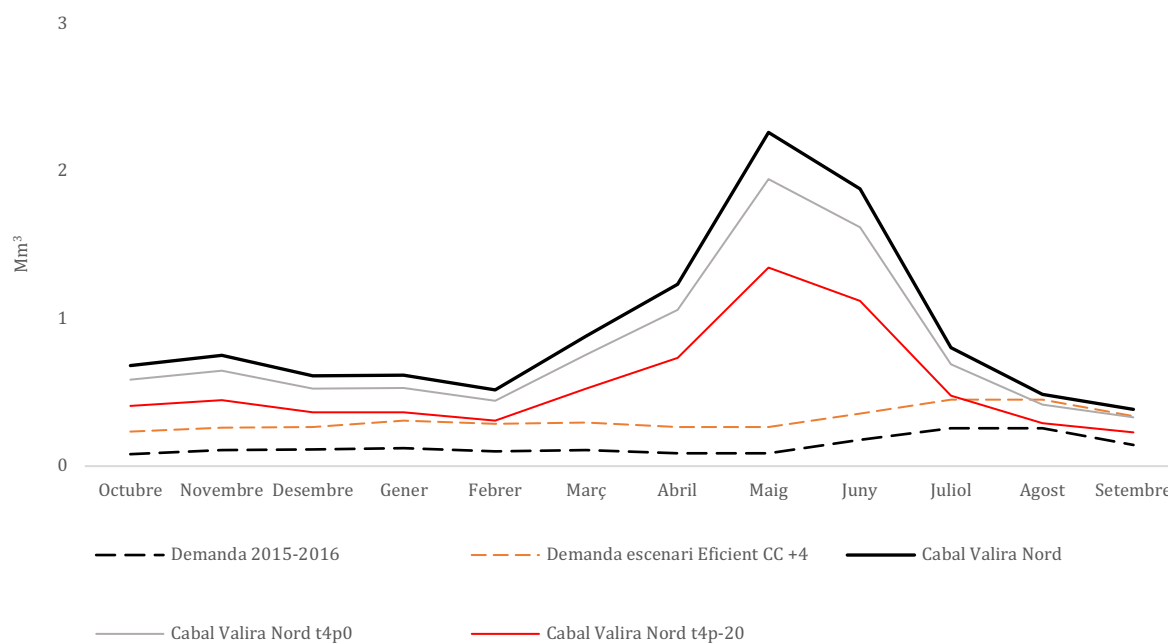


Figura 5.26. Resultats de l'escenari eficient combinat amb els escenaris de canvi climàtic t4p0 i t4p-20 i aplicant els cabals ecològics i la capacitat màxima d'extracció d'aigua per l'horitzó 2049-2050 comparat amb la demanda del 2015-2016 i el cabal del Valira del Nord. Font: Elaboració pròpia

		Octubre	Novembre	Desembre	Gener	Febrer	Març	Abril	Maig	Juny	Juliol	Agost	Setembre	Total	Variació
2015-2016	Demanda 2015-2016	0,08	0,11	0,11	0,12	0,10	0,11	0,09	0,09	0,18	0,26	0,26	0,14	1,65	
	Demanda escenari Decreixement	0,07	0,10	0,10	0,11	0,09	0,10	0,08	0,08	0,17	0,25	0,25	0,13	1,52	-7,82
	Demanda escenari Decreixement CC +2	0,08	0,11	0,12	0,12	0,10	0,11	0,09	0,09	0,18	0,26	0,26	0,15	1,68	1,76
	Demanda escenari Decreixement CC +4	0,21	0,24	0,25	0,28	0,26	0,27	0,24	0,24	0,33	0,42	0,42	0,31	3,49	111,57
	Demanda escenari Eficient	0,09	0,12	0,12	0,13	0,11	0,12	0,10	0,10	0,19	0,27	0,27	0,16	1,78	7,93
	Demanda escenari Eficient CC +2	0,09	0,12	0,12	0,13	0,11	0,12	0,10	0,10	0,19	0,27	0,27	0,16	1,78	7,93
2049-	Demanda escenari Eficient CC +4	0,23	0,26	0,27	0,31	0,29	0,29	0,27	0,27	0,36	0,45	0,45	0,34	3,77	128,99
2050	Demanda escenari estacions esquí CC +2	0,11	0,14	0,15	0,16	0,13	0,14	0,12	0,12	0,21	0,29	0,29	0,18	2,03	23,29
	Demanda escenari estacions esquí CC +4	0,27	0,31	0,31	0,36	0,34	0,34	0,31	0,31	0,40	0,50	0,50	0,39	4,33	162,88
	Demanda escenari estacions esquí	0,09	0,13	0,13	0,14	0,12	0,12	0,10	0,10	0,19	0,27	0,27	0,16	1,83	11,11
	Demanda escenari Referència	0,11	0,13	0,14	0,15	0,13	0,14	0,12	0,12	0,21	0,29	0,29	0,17	1,99	20,53
	Demanda escenari Referència CC +4	0,27	0,30	0,30	0,35	0,33	0,34	0,31	0,31	0,40	0,50	0,50	0,38	4,29	160,11
	Demanda escenari Referència CC +2	0,11	0,13	0,14	0,15	0,13	0,14	0,12	0,12	0,21	0,29	0,29	0,17	1,99	20,53
2015-2016	Cabal Valira Nord	0,68	0,75	0,61	0,62	0,52	0,88	1,23	2,26	1,88	0,80	0,49	0,38	11,11	
	Cabal Valira Nord t2p0	0,62	0,68	0,56	0,56	0,47	0,80	1,12	2,06	1,71	0,73	0,44	0,35	10,11	
2049-	Cabal Valira Nord t2p-20	0,44	0,48	0,39	0,39	0,33	0,56	0,79	1,45	1,20	0,51	0,31	0,25	7,11	
2050	Cabal Valira Nord t4p0	0,59	0,65	0,53	0,53	0,45	0,76	1,06	1,95	1,62	0,69	0,42	0,33	9,56	
	Cabal Valira Nord t2p20	0,85	0,93	0,76	0,76	0,64	1,09	1,53	2,81	2,33	1,00	0,60	0,48	13,78	
	Cabal Valira Nord t4p-20	0,41	0,45	0,36	0,37	0,31	0,52	0,73	1,35	1,12	0,48	0,29	0,23	6,61	
	Cabal Valira Nord AFOR + t2p0	0,63	0,69	0,56	0,56	0,47	0,81	1,13	2,07	1,72	0,74	0,44	0,35	10,17	
	Cabal Valira Nord MANAGEFOR+ t2p0	0,66	0,73	0,59	0,59	0,50	0,85	1,19	2,18	1,82	0,78	0,47	0,37	10,72	

Taula 5.10. Dades de demanda mensuals i de cabal (Mm<sup>3</sup>) segons els escenaris per la Conca Valira del Nord i la variació (%) dels escenaris respecte la demanda del 2015-2016. Font: Elaboració pròpia



### 5.5.6.3. Conca Valira Orient

#### 5.5.6.3.1. Escenari de referència

L'escenari de referència per al riu Valira d'Orient projecta un augment de la demanda d'aigua anual de 16,06 % a l'horitzó 2049-2050 respecte la demanda del 2015-2016 de 4,78 Mm<sup>3</sup> a 5,54 Mm<sup>3</sup>. Quan s'aplica l'escenari de referència combinat amb els escenaris de canvi climàtic la demanda d'aigua augmenta un 16,06 % (5,54 Mm<sup>3</sup>) quan la temperatura augmenta 2 °C i un 125,3 % (10,76 Mm<sup>3</sup>) quan la temperatura augmenta 4 °C.

Pel cabal del Valira d'Orient aquest varia per a tots els escenaris socioeconòmics, segons els diferents escenaris de canvi climàtic i d'usos del sòl considerant els cabals ecològics i la màxima capacitat d'extracció passant de 19 Mm<sup>3</sup> el 2015-2016 a 17 Mm<sup>3</sup>, 12 Mm<sup>3</sup>, 16 Mm<sup>3</sup>, 24 Mm<sup>3</sup>, 12 Mm<sup>3</sup>, 18 Mm<sup>3</sup> i 19 Mm<sup>3</sup> segons els escenaris climàtics t2p0, t2p-20, t4p0, t2p20, t4p-20, AFOR + t2p0 i MANAGEFOR + t2p0 (taula 5.11).

Per a la majoria d'escenaris de referència els conflictes entre demanda i recurs hídric són més presents en la conca del Valira d'Orient. Aquesta conca presenta més competència entre les diferents demandes d'aigua i les situacions conflictuals augmenten durant l'any i no es donen només quan la temperatura augmenta 4 °C si no que quan augmenta 2 °C ja s'observen punts de conflicte. Destacar que és la única conca que presenta una demanda superior al recurs durant el mes de gener quan es considera l'escenari climàtic d'augment de la temperatura de 2 °C i una disminució de la precipitació del 20 %. En aquest cas el cabal disminuirà un 36 % i serà de 0,56 Mm<sup>3</sup> (t2p-20) i la demanda d'aigua de 0,62 Mm<sup>3</sup> sent superior a un 9,9 % (figura 5.27).

Quan la temperatura augmenta 4 °C els períodes de conflicte són més importants produint-se durant l'estiu del juliol al setembre i a finals de tardor i durant l'hivern del novembre al març (figura 5.28).

El mes de juliol el conflicte es dona amb un escenari climàtic t4p-20 amb un cabal que disminuirà un 40,5 % essent de 0,84 Mm<sup>3</sup>, la demanda d'aigua serà de 1,01 Mm<sup>3</sup> essent superior de 19,6 %. Amb la mateixa disminució de cabal el mes d'agost tindrem valors

de 0,5 Mm<sup>3</sup> i durant el setembre de 0,4 Mm<sup>3</sup> la demanda d'aigua serà de 1,01 Mm<sup>3</sup> i 0,87 Mm<sup>3</sup> sent superior de 101,5 % i 119,9 % respectivament.

Durant el mes d'agost i setembre existirà un conflicte amb l'escenari climàtic t4p0 que provocarà una disminució del cabal del 14 % amb un valor de 0,77 Mm<sup>3</sup> i 0,57 Mm<sup>3</sup> pel mes d'agost i setembre respectivament. La demanda d'aigua el mes d'agost serà de 1,01 Mm<sup>3</sup> i al setembre de 0,87 Mm<sup>3</sup> sent superior de 39,4 % i 52,2 % respectivament (taula 5.11).

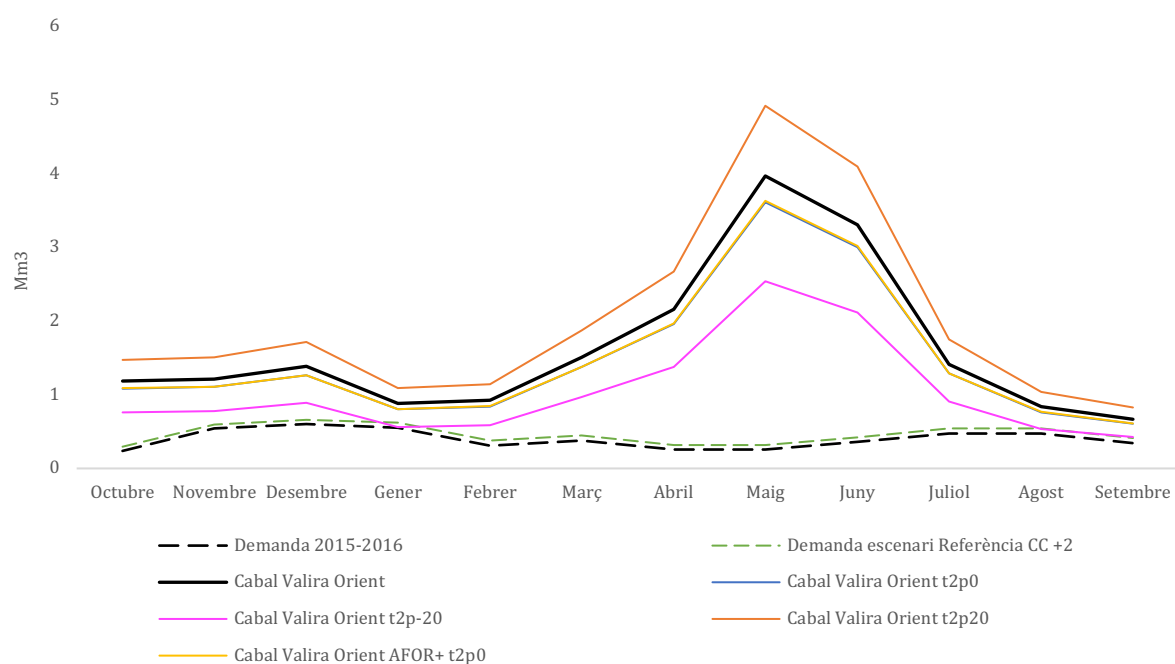


Figura 5.27 Resultats de l'escenari de referència combinat amb els escenaris de canvi climàtic t2p0, t2p-20, t2p20 i l'escenari d'usos del sòl AFOR + t2p0 aplicant els cabals ecològics i la capacitat màxima d'extracció d'aigua per l'horitzó 2049-2050 comparat amb la demanda del 2015-2016 i el cabal del Valira d'Orient. Font: Elaboració pròpia

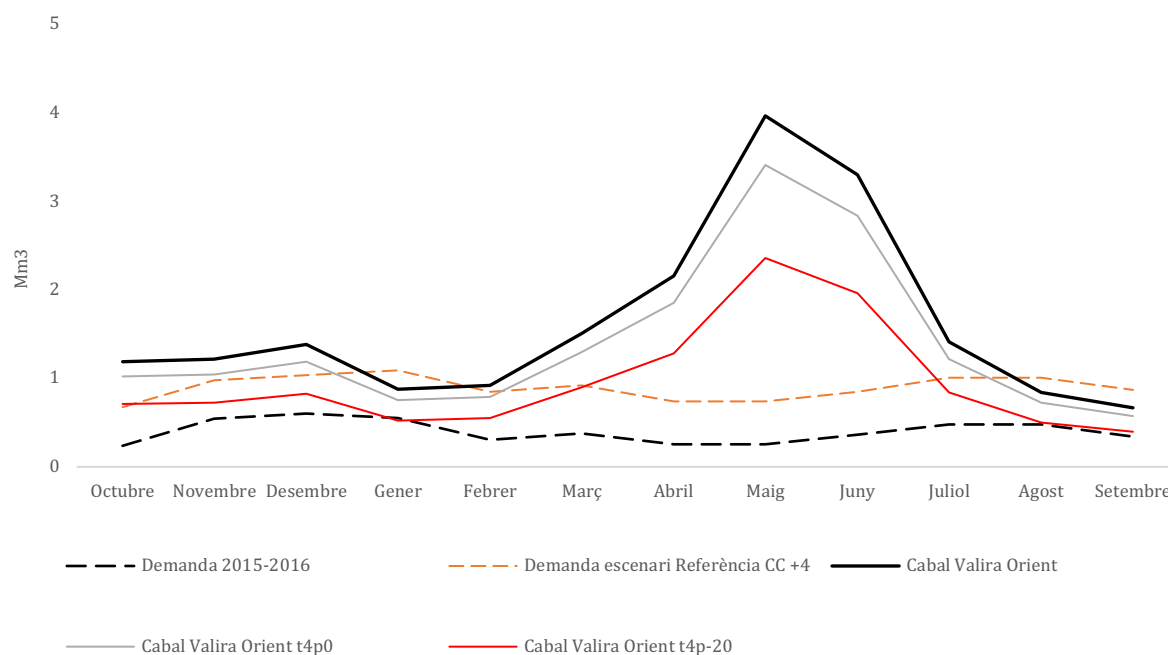


Figura 5.28 Resultats de l'escenari de referència combinat amb els escenaris de canvi climàtic t4p0 i t4p-20 i aplicant els cabals ecològics i la capacitat màxima d'extracció d'aigua per l'horitzó 2049-2050 comparat amb la demanda del 2015-2016 i el cabal del Valira d'Orient. Font: Elaboració pròpia

#### 5.5.6.3.2. Escenari de decreixement

L'escenari de decreixement per a la Conca del Valira d'Orient projecta que la demanda d'aigua anual disminueixi un 7,79 % a l'horitzó 2049-2050 respecte la demanda del 2015-2016 de 4,78 Mm<sup>3</sup> a 4,40 Mm<sup>3</sup>. Quan s'aplica l'escenari de decreixement combinat amb els diferents escenaris de canvi climàtic la demanda d'aigua disminueix un 0,29 % (4,76 Mm<sup>3</sup>) quan la temperatura augmenta 2 °C i augmenta un 85,6 % (8,87 Mm<sup>3</sup>) quan la temperatura augmenta 4 °C (taula 5.11).

L'escenari de decreixement permetrà disposar de suficient recurs per satisfer les demandes (figura 5.29), excepte quan la temperatura augmenta 4 °C on existirà una situació crítica i la demanda serà superior durant l'estiu d'agost a setembre i durant l'hivern de novembre a febrer quan el cabal disminueix sota els escenaris climàtics t4p-20 i t4p0 (figura 5.30).

Durant l'agost la demanda d'aigua serà de  $0,84 \text{ Mm}^3$  i el cabal sota l'escenari t4p-20 serà de  $0,50 \text{ Mm}^3$  i sota l'escenari t4p0 de  $0,72 \text{ Mm}^3$ . La demanda serà superior de 67,7 % i 16 % pels escenaris t4p-20 i t4p0 respectivament.

Durant el setembre la demanda d'aigua serà de  $0,7 \text{ Mm}^3$  i el cabal sota l'escenari t4p-20 serà de  $0,40 \text{ Mm}^3$  i sota l'escenari t4p0 de  $0,57 \text{ Mm}^3$ . La demanda serà superior de 77,5 % i 22,8 % pels escenaris t4p-20 i t4p0 respectivament.

Durant el novembre la demanda d'aigua serà de  $0,84 \text{ Mm}^3$  i el cabal sota l'escenari t4p-20 serà de  $0,72 \text{ Mm}^3$  essent la demanda superior de 16,6 %.

Durant el desembre la demanda d'aigua serà de  $0,9 \text{ Mm}^3$  i el cabal sota l'escenari t4p-20 serà de  $0,82 \text{ Mm}^3$  essent la demanda superior de 9,5 %.

Durant el gener la demanda d'aigua serà de  $0,92 \text{ Mm}^3$  i el cabal sota l'escenari t4p-20 serà de  $0,52 \text{ Mm}^3$  i sota l'escenari t4p0 de  $0,76 \text{ Mm}^3$ . La demanda serà superior de 75,3 % i 21,3 % pels escenaris t4p-20 i t4p0 respectivament.

Pel mes de febrer la demanda d'aigua serà de  $0,67 \text{ Mm}^3$  i el cabal sota l'escenari t4p-20 serà de  $0,55 \text{ Mm}^3$  essent la demanda superior de 23 %. Per tant, els conflictes seran més presents durant l'any en aquesta conca quan es produeix l'escenari de canvi climàtic més extrem (taula 5.11).

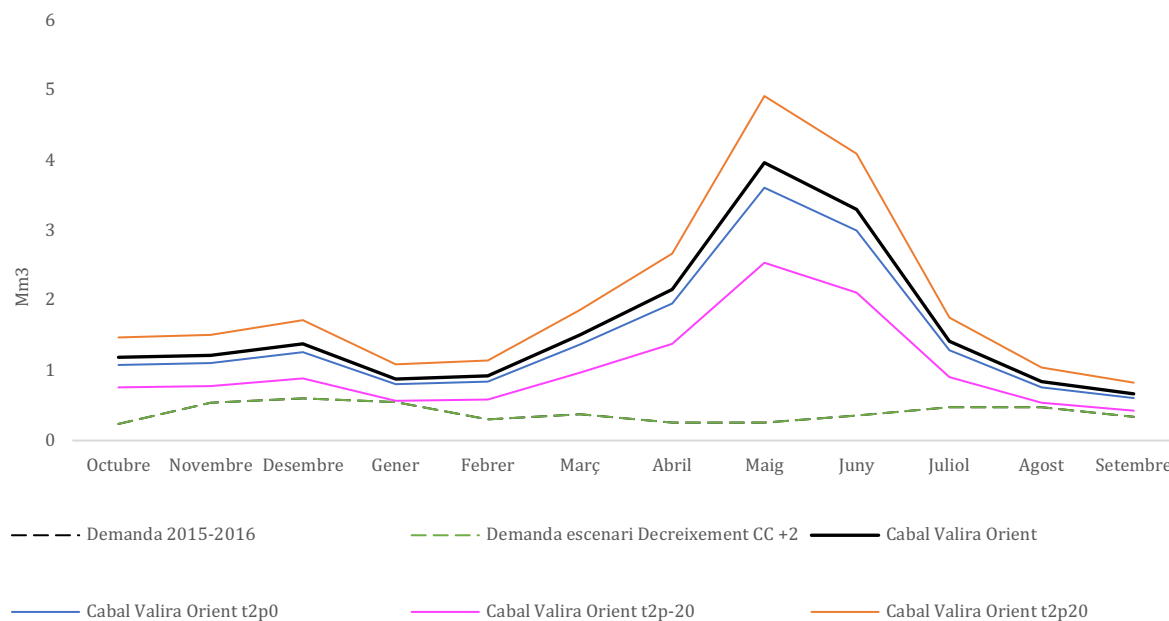


Figura 5.29. Resultats de l'escenari de decreixement combinat amb els escenaris de canvi climàtic t2p0, t2p-20 i t2p20 i aplicant els cabals ecològics i la capacitat màxima d'extracció d'aigua per l'horitzó 2049-2050 comparat amb la demanda del 2015-2016 i el cabal del Valira d'Orient. Font: Elaboració pròpia

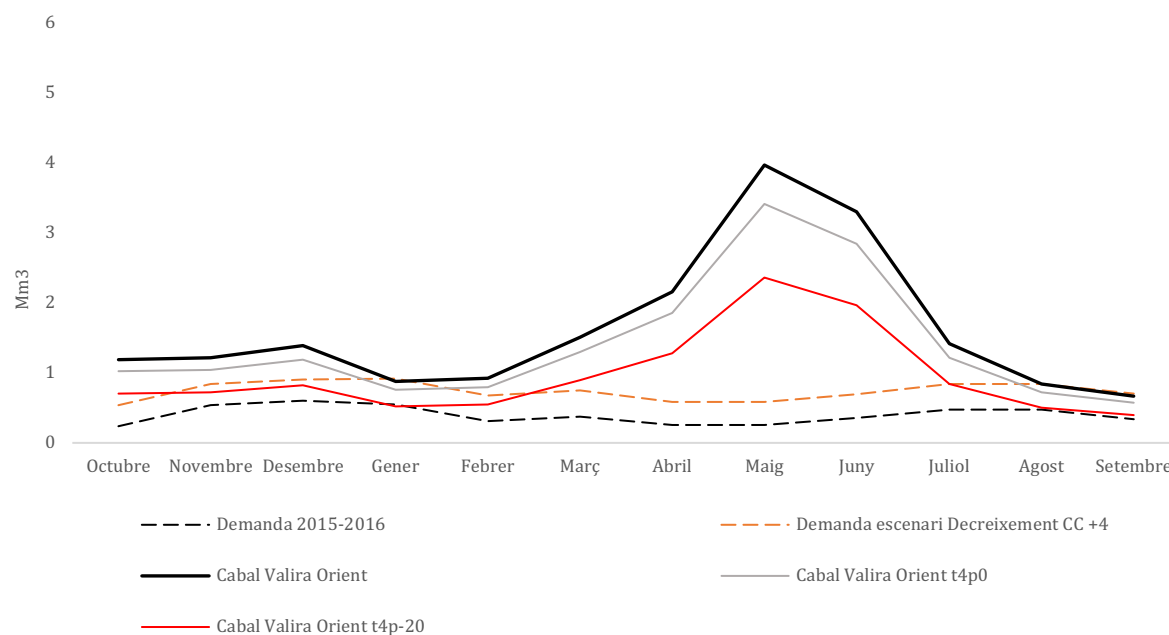


Figura 5.30. Resultats de l'escenari de decreixement combinat amb els escenaris de canvi climàtic t4p0 i t4p-20 i aplicant els cabals ecològics i la capacitat màxima d'extracció d'aigua per l'horitzó 2049-2050 comparat amb la demanda del 2015-2016 i el cabal del Valira d'Orient. Font: Elaboració pròpia

### 5.5.6.3.3. Escenari de futur creixement de la producció de neu artificial

Quan la producció de neu artificial augmenta s'observa un augment de la demanda d'aigua a l'horitzó 2050. La demanda d'aigua anual augmentarà un 14,15 % a l'horitzó 2049-2050 respecte la demanda del 2015-2016 de 4,78 Mm<sup>3</sup> a 5,45 Mm<sup>3</sup>. Quan es combina l'escenari amb els diferents escenaris de canvi climàtic la demanda d'aigua augmenta un 23,7 % (5,91 Mm<sup>3</sup>) quan la temperatura augmenta 2 °C i un 132,9 % (11,12 Mm<sup>3</sup>) quan la temperatura augmenta 4 °C.

Per aquest escenari es torna a tenir un conflicte entre demanda d'aigua i cabal quan la temperatura augmenta 2 °C i la precipitació disminueix un 20 % (figura 5.31). Aquesta situació es dona durant el mes de gener com en l'escenari de referència. En aquest cas el cabal disminueix un 36 % sota l'escenari t2p-20 amb un valor de 0,56 Mm<sup>3</sup> i la demanda serà de 0,70 Mm<sup>3</sup> essent superior de 23,7 %.

De la mateixa manera la demanda serà superior al recurs durant els mesos de juliol, agost i setembre i d'octubre a març sota l'escenari climàtic d'augment de la temperatura de 4 °C (figura 5.32).

Durant els mesos de juliol, agost i setembre la demanda d'aigua serà de 1,02 Mm<sup>3</sup>, 1,02 Mm<sup>3</sup> i 0,88 Mm<sup>3</sup>, el cabal sota l'escenari t4p-20 (disminució del cabal del 40,5 %) serà de 0,84 Mm<sup>3</sup>, 0,5 Mm<sup>3</sup> i 0,4 Mm<sup>3</sup> essent la demanda superior de 20,7 %, 103,3 % i 122,2 % respectivament. Quan el cabal disminueix sota l'escenari t4p0 (disminució del cabal del 14 %) el cabal serà inferior pels mesos d'agost i setembre essent de 0,72 Mm<sup>3</sup> i 0,57 Mm<sup>3</sup>, en aquest cas la demanda serà superior de 40,6 % i 53,7 % respectivament.

Durant els mesos de novembre, desembre, gener, febrer i març la demanda d'aigua serà de 1,06 Mm<sup>3</sup>, 1,14 Mm<sup>3</sup>, 1,17 Mm<sup>3</sup>, 0,86 Mm<sup>3</sup> i 0,95 Mm<sup>3</sup> respectivament i el cabal sota l'escenari t4p-20 serà de 0,72 Mm<sup>3</sup>, 0,82 Mm<sup>3</sup>, 0,52 Mm<sup>3</sup>, 0,55 Mm<sup>3</sup> i 0,9 Mm<sup>3</sup> respectivament essent la demanda superior de 47,3 %, 38,3 %, 123,1 %, 56,8 % i 5,8 % respectivament. Quan es considera el cabal sota l'escenari t4p0 els conflictes disminueixen i es donen el mes de novembre, de gener i febrer, amb un cabal de 1,04

Mm<sup>3</sup>, 0,76 Mm<sup>3</sup> i 0,70 Mm<sup>3</sup> respectivament presentant una demanda superior de 1,9 %, 54,3 % i 8,5 % respectivament (taula 5.11).

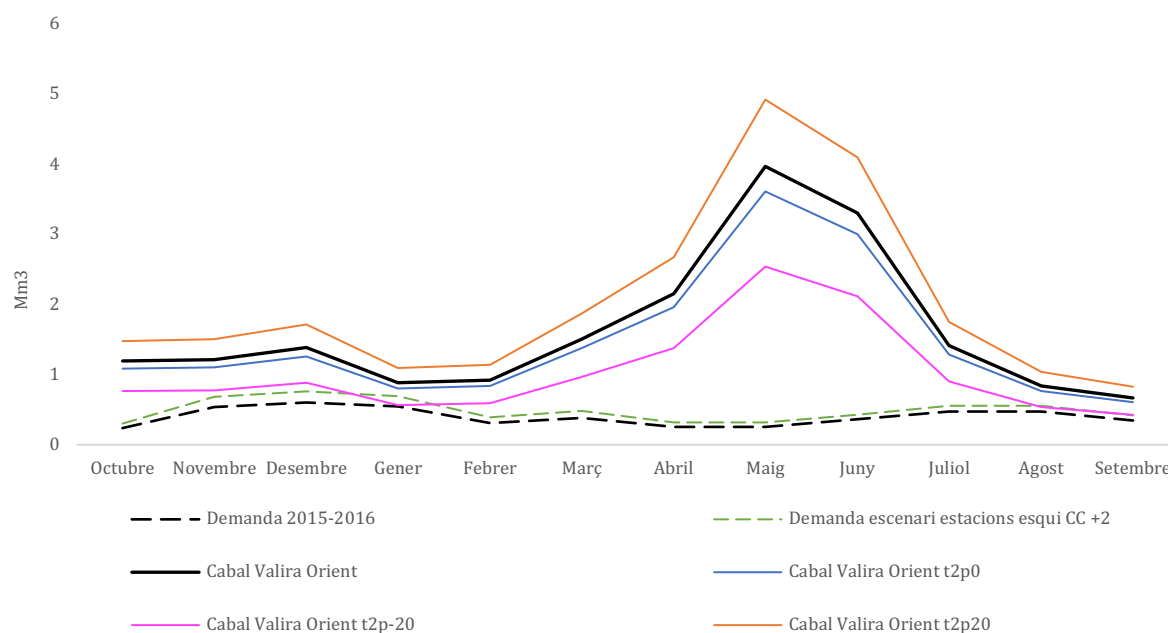


Figura 5.31. Resultats de l'escenari de futur creixement de la producció de neu artificial combinat amb els escenaris de canvi climàtic t2p0, t2p-20 i t2p20 aplicant els cabals ecològics i la capacitat màxima d'extracció d'aigua per l'horitzó 2049-2050 comparat amb la demanda del 2015-2016 i el cabal del Valira d'Orient. Font: Elaboració pròpia

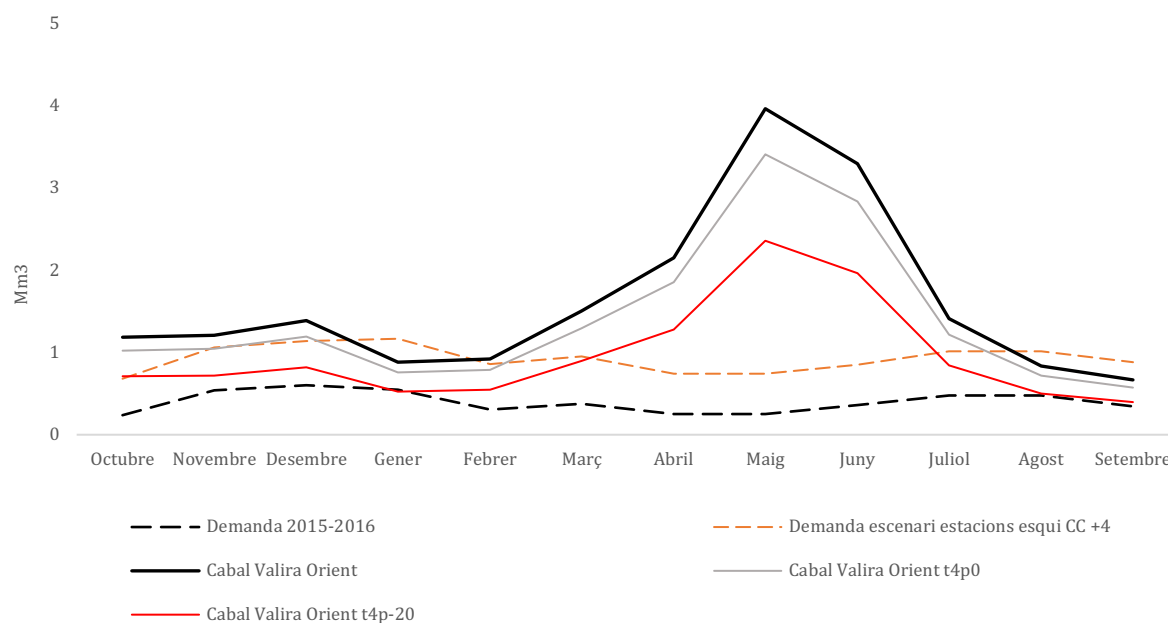


Figura 5.32. Resultats de l'escenari de futur creixement de la producció de neu artificial combinat amb els escenaris de canvi climàtic t4p0 i t4p-20 aplicant els cabals ecològics i la capacitat màxima d'extracció d'aigua per l'horitzó 2049-2050 comparat amb la demanda del 2015-2016 i el cabal del Valira d'Orient. Font: Elaboració pròpia

#### 5.5.6.3.4. Escenari eficient

Quan es té en compte un escenari eficient amb la implementació de mesures la demanda d'aigua anual augmentarà un 4,81 % a l'horitzó 2049-2050 respecte la demanda del 2015-2016 de 4,78 Mm<sup>3</sup> a 5,01 Mm<sup>3</sup>. Quan s'aplica l'escenari eficient combinat amb els diferents escenaris de canvi climàtic la demanda d'aigua augmenta un 4,81 % (5,01 Mm<sup>3</sup>) quan la temperatura augmenta 2 °C i un 99,51 % (9,53 Mm<sup>3</sup>) quan la temperatura augmenta 4 °C.

L'escenari eficient permetrà disposar de suficient recurs i les demandes es podran satisfer quan la temperatura augmenta 2 ° C (figura 5.33).

De la mateixa manera, quan la temperatura augmenta 4 °C existiran conflictes entre demanda d'aigua i disponibilitat d'aigua (figura 5.34).

Durant els mesos de juliol, agost i setembre la demanda d'aigua serà de 0,9 Mm<sup>3</sup>, 0,9 Mm<sup>3</sup> i 0,76 Mm<sup>3</sup>, el cabal sota l'escenari t4p-20 (disminució del cabal del 40,5 %) serà de 0,84 Mm<sup>3</sup>, 0,5 Mm<sup>3</sup> i 0,4 Mm<sup>3</sup> essent la demanda superior de 6,6 %, 79,6 % i 92,4 % respectivament. Quan el cabal disminueix sota l'escenari t4p0 (disminució del cabal del 14 %) aquest serà inferior pels mesos d'agost i setembre essent de 0,72 Mm<sup>3</sup> i 0,57 Mm<sup>3</sup>, en aquest cas la demanda serà superior de 24,2 % i 33,1 % respectivament.

Durant els mesos de novembre, desembre, gener i febrer la demanda d'aigua serà de 0,89 Mm<sup>3</sup>, 0,95 Mm<sup>3</sup>, 0,98 Mm<sup>3</sup> i 0,74 Mm<sup>3</sup> respectivament i el cabal sota l'escenari t4p-20 serà de 0,72 Mm<sup>3</sup>, 0,82 Mm<sup>3</sup>, 0,52 Mm<sup>3</sup> i 0,55 Mm<sup>3</sup> respectivament essent la demanda superior de 23,2 %, 15,3 %, 86,8 % i 34 % respectivament. Quan es considera el cabal sota l'escenari t4p0 els conflictes disminueixen i es donen el mes de gener únicament, amb un cabal de 0,76 Mm<sup>3</sup> presentant una demanda superior de 29,2 % (taula 5.11).



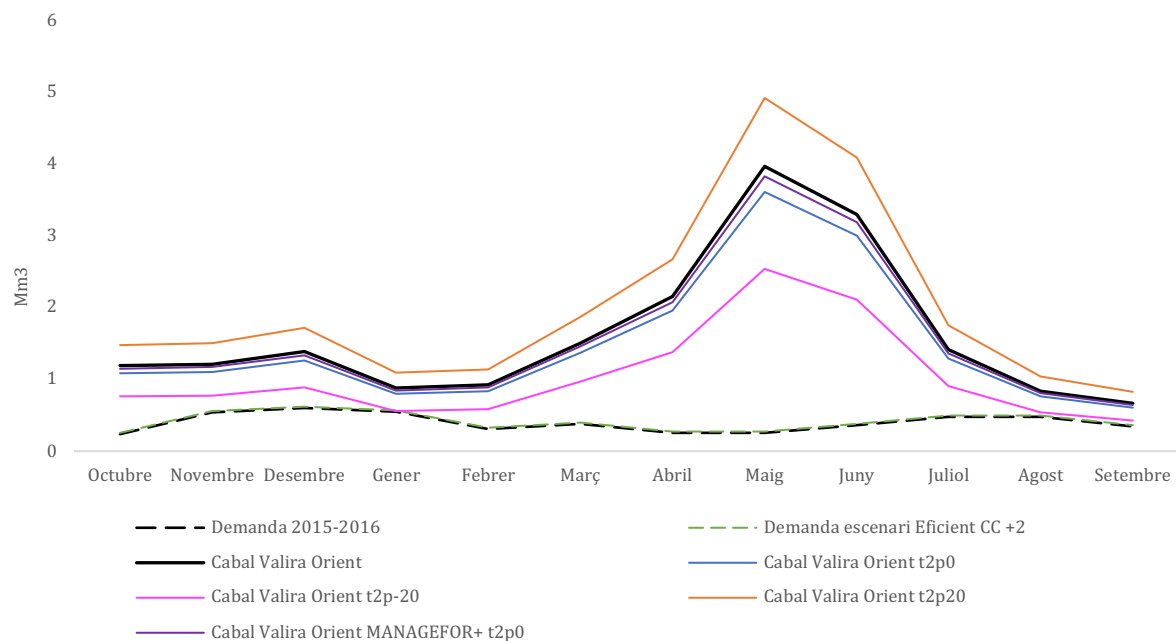


Figura 5.33. Resultats de l'escenari eficient combinat amb els escenaris de canvi climàtic t2p0, t2p-20, t2p20 i l'escenari d'usos del sòl MANAGEFOR+ t2p0 aplicant els cabals ecològics i la capacitat màxima d'extracció d'aigua per l'horitzó 2049-2050 comparat amb la demanda del 2015-2016 i el cabal del Valira d'Orient. Font: Elaboració pròpia

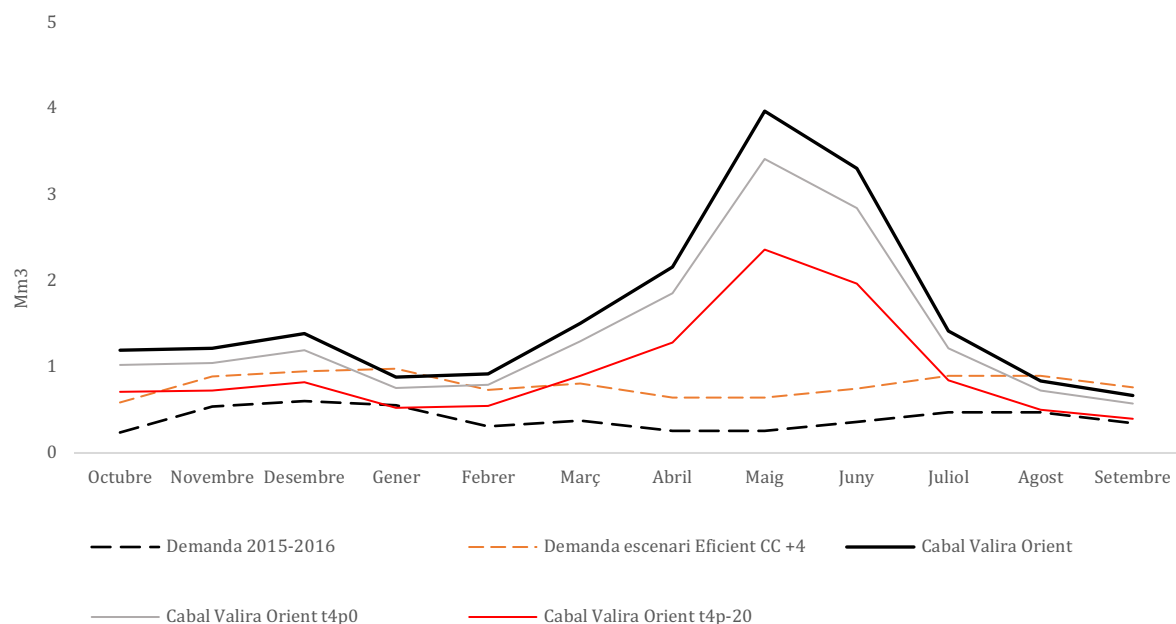


Figura 5.34. Resultats de l'escenari eficient combinat amb els escenaris de canvi climàtic t4p0 i t4p-20 aplicant els cabals ecològics i la capacitat màxima d'extracció d'aigua per l'horitzó 2049-2050 comparat amb la demanda del 2015-2016 i el cabal del Valira d'Orient. Font: Elaboració pròpia

		Octubre	Novembre	Desembre	Gener	Febrer	Març	Abril	Maig	Juny	Juliol	Agost	Setembre	Total	Variació
2015-2016	Demanda 2015-2016	0,24	0,54	0,60	0,55	0,31	0,38	0,25	0,25	0,36	0,48	0,48	0,34	4,78	
2049-2050	Demanda escenari Decreixement	0,21	0,52	0,58	0,52	0,27	0,34	0,22	0,22	0,33	0,44	0,44	0,31	4,40	-7,79
	Demanda escenari Decreixement CC +2	0,24	0,54	0,60	0,55	0,30	0,38	0,25	0,25	0,36	0,47	0,47	0,34	4,76	-0,29
	Demanda escenari Decreixement CC +4	0,54	0,84	0,90	0,92	0,67	0,75	0,59	0,59	0,69	0,84	0,84	0,70	8,87	85,61
	Demanda escenari Eficient	0,26	0,56	0,62	0,57	0,33	0,40	0,27	0,27	0,38	0,50	0,50	0,36	5,01	4,81
	Demanda escenari Eficient CC +2	0,26	0,56	0,62	0,57	0,33	0,40	0,27	0,27	0,38	0,50	0,50	0,36	5,01	4,81
	Demanda escenari Eficient CC +4	0,59	0,89	0,95	0,98	0,74	0,81	0,64	0,64	0,75	0,90	0,90	0,76	9,53	99,51
	Demanda escenari estacions esquí CC +2	0,30	0,68	0,76	0,70	0,39	0,48	0,32	0,32	0,43	0,55	0,55	0,42	5,91	23,68
	Demanda escenari estacions esquí CC +4	0,68	1,06	1,14	1,17	0,86	0,95	0,75	0,75	0,85	1,02	1,02	0,88	11,12	132,87
	Demanda escenari estacions esquí	0,27	0,65	0,73	0,66	0,35	0,44	0,29	0,29	0,39	0,51	0,51	0,38	5,45	14,15
	Demanda escenari Referència	0,30	0,60	0,66	0,62	0,38	0,45	0,32	0,32	0,42	0,54	0,54	0,41	5,54	16,06
	Demanda escenari Referència CC +4	0,67	0,98	1,04	1,09	0,85	0,92	0,74	0,74	0,85	1,01	1,01	0,87	10,76	125,25
	Demanda escenari Referència CC +2	0,30	0,60	0,66	0,62	0,38	0,45	0,32	0,32	0,42	0,54	0,54	0,41	5,54	16,06
2015-2016	Cabal Valira Orient	1,19	1,21	1,39	0,88	0,92	1,51	2,16	3,97	3,30	1,41	0,84	0,67	19,45	
2049-2050	Cabal Valira Orient t2p0	1,08	1,10	1,26	0,80	0,84	1,37	1,96	3,61	3,00	1,29	0,76	0,61	17,70	
	Cabal Valira Orient t2p-20	0,76	0,78	0,89	0,56	0,59	0,97	1,38	2,54	2,11	0,91	0,54	0,43	12,45	
	Cabal Valira Orient t4p0	1,02	1,04	1,19	0,76	0,79	1,30	1,85	3,41	2,84	1,22	0,72	0,57	16,72	
	Cabal Valira Orient t2p20	1,48	1,51	1,72	1,09	1,14	1,87	2,67	4,92	4,09	1,75	1,04	0,83	24,11	
	Cabal Valira Orient t4p-20	0,71	0,72	0,82	0,52	0,55	0,90	1,28	2,36	1,96	0,84	0,50	0,40	11,57	
	Cabal Valira Orient AFOR+ t2p0	1,09	1,11	1,27	0,81	0,84	1,38	1,97	3,63	3,02	1,29	0,77	0,61	17,79	
	Cabal Valira Orient MANAGEFOR+ t2p0	1,15	1,17	1,34	0,85	0,89	1,46	2,08	3,83	3,19	1,36	0,81	0,64	18,77	

Taula 5.11. Dades de demanda mensuals i de cabal (Mm<sup>3</sup>) segons els escenaris per la Conca Valira d'Orient i la variació (%) dels escenaris respecte la demanda del 2015-2016. Font: Elaboració pròpia

El model WEAP Andorra permet analitzar una sèrie d'escenaris combinant tant els canvis a nivell del clima com els canvis socioeconòmics. També es pot observar que a grans trets Andorra disposa de suficient recurs hídric a dia d'avui i disposarà d'una bona quantitat de disponibilitat d'aigua a l'horitzó 2050 a excepció d'alguns casos puntuals que s'hauran de tenir en compte.

Pel cas de la Conca del Gran Valira cap escenari crearà un conflicte a l'horitzó 2050 i es podran satisfer totes les demandes (figura 5.35). Quan en canvi, tenim en compte conques més petites la situació canvia.

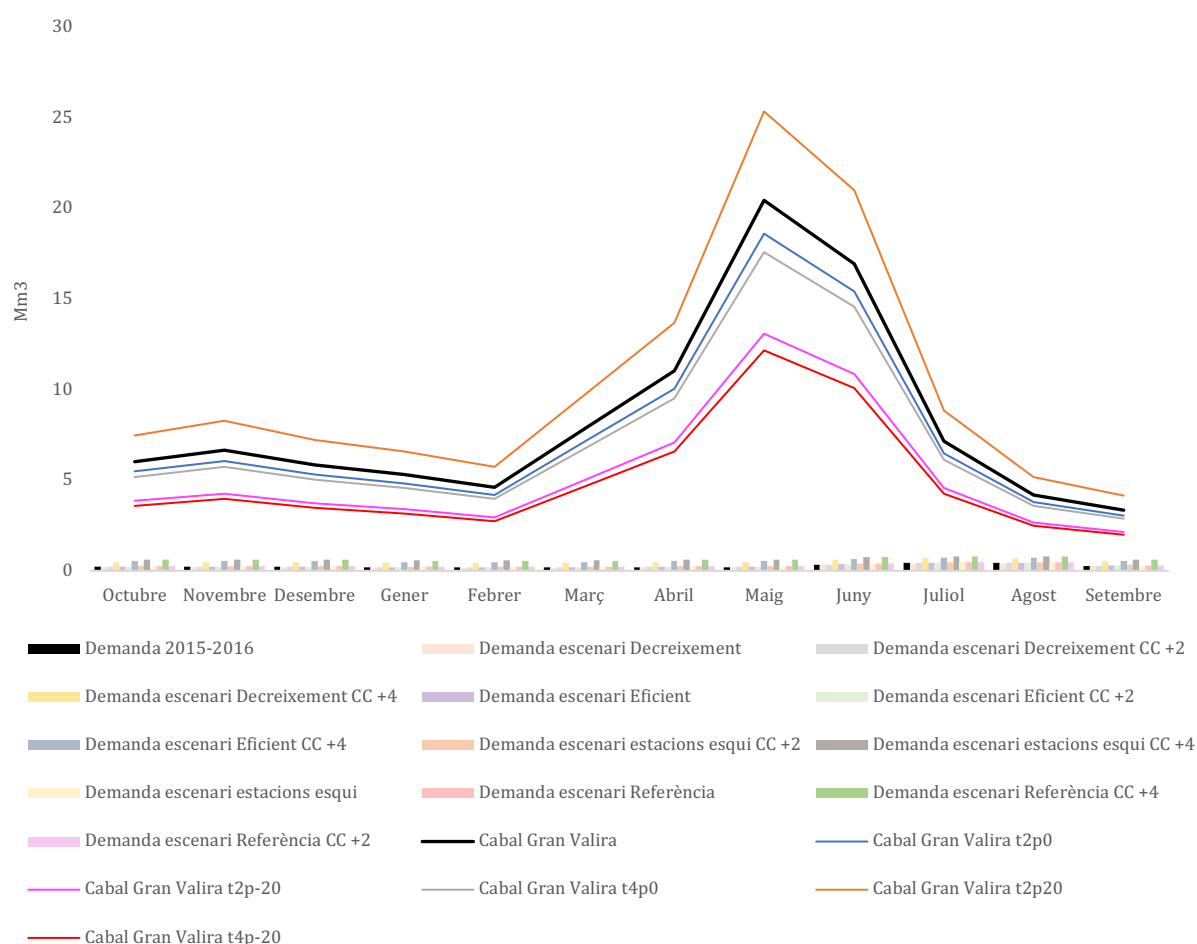


Figura 5.35. Variació de la demanda i del cabal (en Mm³) segons els diferents escenaris a l'horitzó 2050 respecte el 2015 per la Conca del Gran Valira. Font: Elaboració pròpia

Pel cas de la Conca del Valira del Nord (Figura 5.36), amb la majoria d'escenaris es satisfaran sense problema les demandes d'aigua però existiran moments durant l'any

que sota una sèrie d'escenaris concrets aquestes demandes no podran ser satisfetes i entraran en conflicte els diferents usos de l'aigua. Aquests episodis de conflicte es donaran sobretot a l'estiu, durant els mesos de juliol, agost i setembre i tots sota l'escenari d'augment de la temperatura de 4 °C i considerant les assumpcions d'excloure els cabals ecològics i la capacitat màxima de captació. Els majors conflictes es donaran amb els escenaris de futur creixement de la producció de neu artificial i l'escenari de referència.

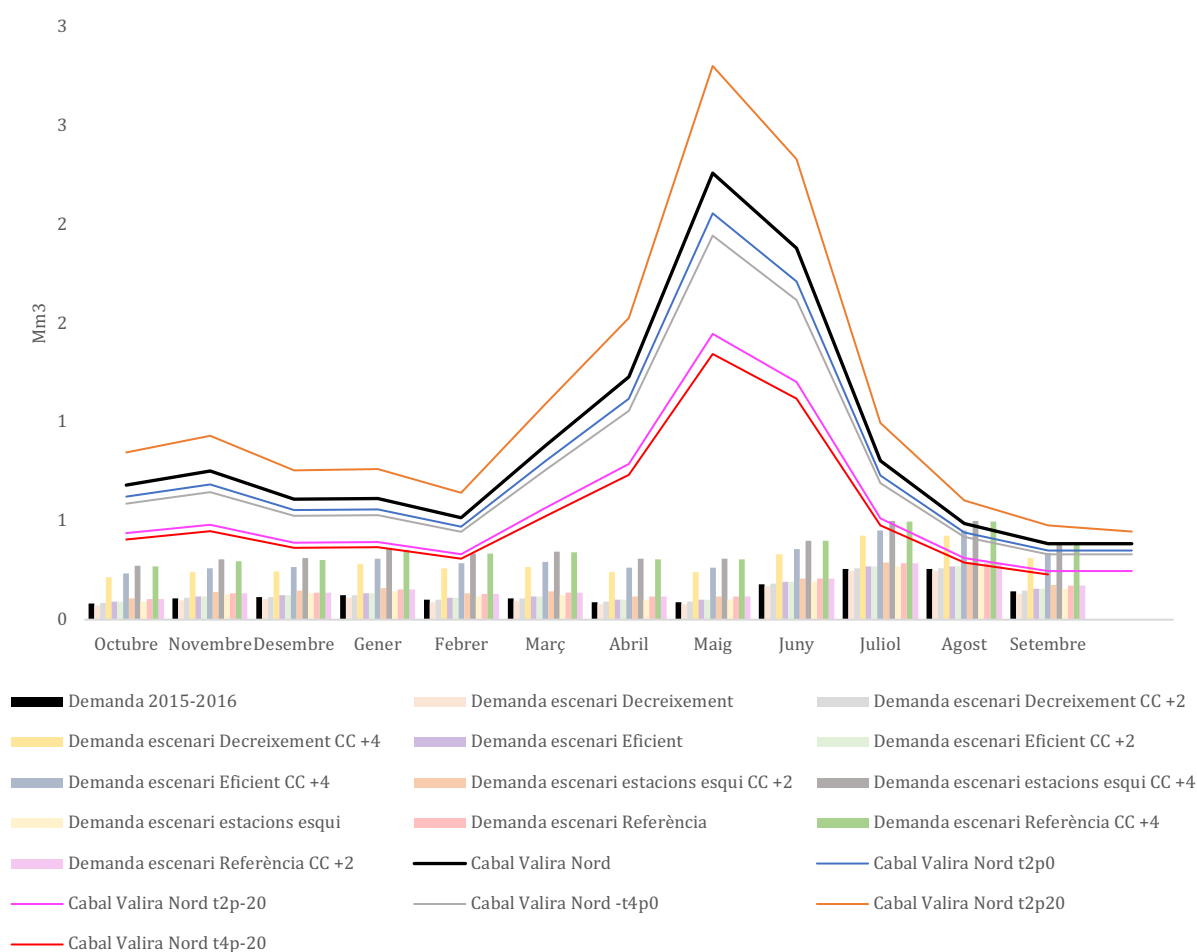


Figura 5.36. Variació de la demanda i del cabal (en Mm³) segons els diferents escenaris a l'horitzó 2050 respecte el 2015 per la Conca del Valira del Nord. Font: Elaboració pròpia

La conca del Valira d'Orient (figura 5.37) presenta més zones de conflicte possiblement per la competència entre les diferents demandes en diferents èpoques de l'any. És l'únic cas que presenta un període de conflicte a l'hivern durant el mes de gener quan la temperatura augmenta 2 °C i la precipitació disminueix un 20 % amb els escenaris de referència i de futura producció de neu artificial.

La resta de conflictes es donen quan la temperatura augmenta 4 °C. Aquests episodis apareixen a l'hivern durant els mesos de novembre a febrer i a l'estiu de juliol a setembre per diferents escenaris socioeconòmics. Per tant, en aquesta conca els conflictes són més llargs durant l'any sobretot durant l'hivern.

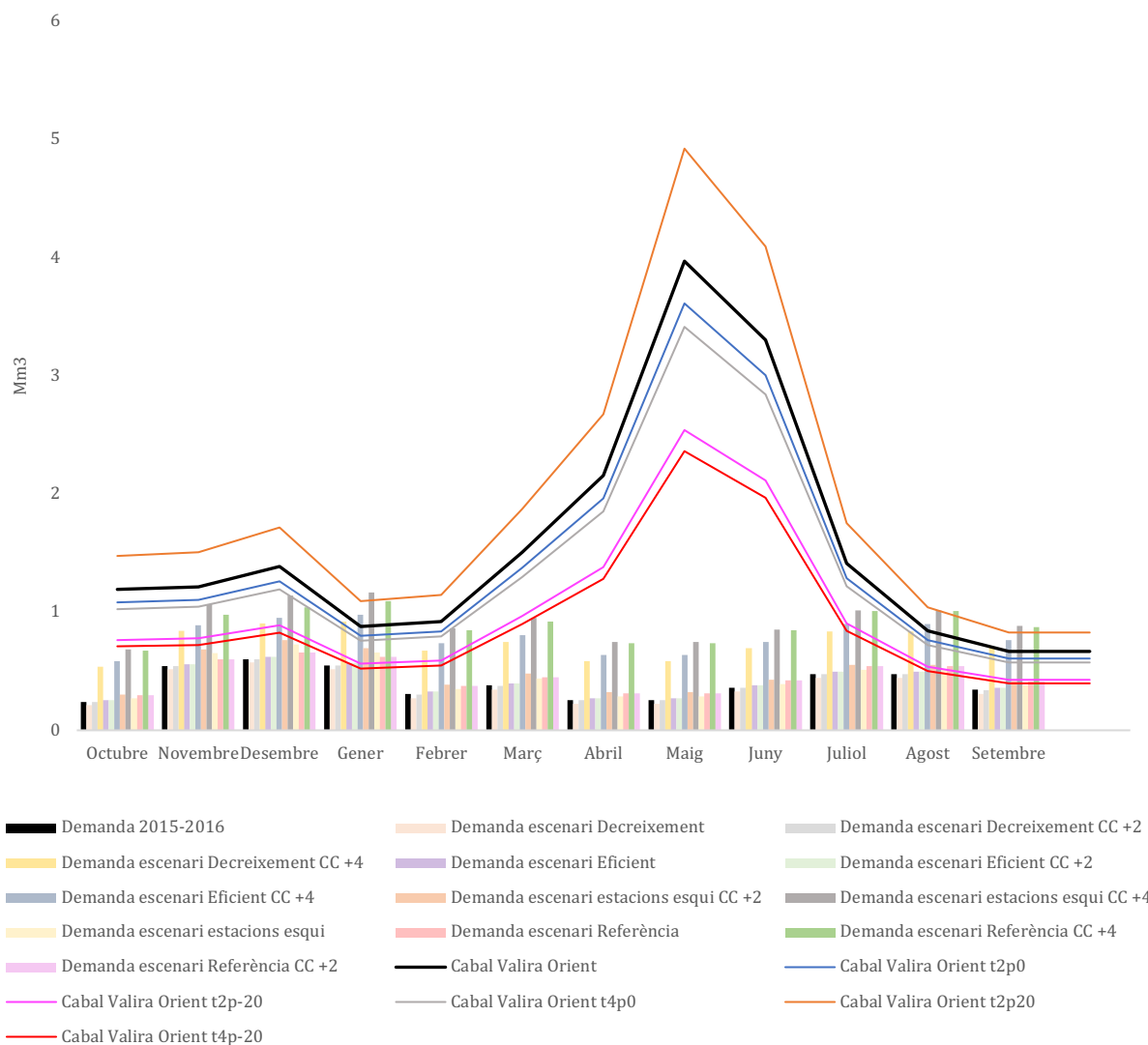


Figura 5.37. Variació de la demanda i del cabal (en Mm³) segons els diferents escenaris a l'horitzó 2050 respecte el 2015 per la Conca del Valira d'Orient. Font: Elaboració pròpia

Concloure que per la Conca del Gran Valira no apareixen zones de conflicte a l'horitzó 2050 sota cap escenari. En canvi en conques més petites ja comencem a veure zones on poden entrar en conflicte la disponibilitat de l'aigua amb les diferents demandes. Aquests conflictes s'observen majoritàriament quan la temperatura augmenta 4 °C a excepció de la Conca del Valira d'Orient durant el mes de gener on l'augment de 2 °C

també pot provocar un episodi de conflicte entre demanda d'aigua i disponibilitat de recurs. Aquest cas es dona sota l'escenari de referència i de producció de neu artificial. Quan en canvi es té en compte un augment de la temperatura de 4 °C les zones de conflicte s'amplifiquen i són també més llargues en el temps.

Per tant, un dels escenaris que sembla donar més conflictes en un futur és la producció de neu artificial. La Conca del Valira d'Orient és la que presentarà més conflictes ja que existeixen més competències entre les demandes que en determinats moments de l'any, com pot ser l'hivern (degut a la producció de neu artificial i al turisme) poden entrar en conflicte i posar en dificultat la disponibilitat de recurs hídric per satisfer totes les demandes. Es sota aquest escenari que existeixen conflictes quan la temperatura augmenta 2 °C que podria ser un escenari més esperat a l'horitzó 2050 que l'augment de temperatura de 4 °C.

Tot i disposar de suficient recurs per a satisfer les demandes segons les projeccions de la majoria dels escenaris analitzats per l'horitzó 2050, en alguns dels diferents escenaris, especialment aquells que es preveu continuïtat de la tendència de creixement de la població, urbanística i turística on degut als efectes del canvi climàtic en la disminució del recurs hídric, i tenint en compte la infraestructura de captació i distribució actual, s'identifiquen dificultats alguns períodes de l'any per les conques del Valira del Nord i d'Orient per poder satisfer tota la demanda hídrica de tots els sectors. Per contra, en els escenaris que preveuen mesures d'estalvi i eficiència o inclús decreixement s'observa com aquestes mesures permeten mitigar i contrarestar el efectes adversos del canvi climàtic sobre la disponibilitat del recurs hídric.

## **5.6. Punts clau del capítol**

- El model WEAP s'ha mostrat adient per modelitzar de forma integral la demanda i els consums i avaluar diferents escenaris de canvi climàtic i socioeconòmics sobre la demanda d'aigua.
- S'han definit quatre escenaris socioeconòmics (Referència, Decreixement, Futur creixement de la producció de neu artificial i Eficient) que s'han combinat amb els diferents escenaris de canvi climàtic (t2p0, t2p-20, t4p0, t2p20 i t4p-20) i

d'usos del sòl (AFOR+t2p0 i MANAGEFOR + t2p0) (On  $t$  es refereix al canvi en la temperatura i  $p$  el canvi en la precipitació).

- Si s'analitza a escala global les tres conques hidrogràfiques es pot afirmar que en l'actualitat es disposa de suficient recurs hídric per fer front a les diferents demandes.
- No obstant, en certs moments de l'any i en determinades zones les diferents demandes poden entrar en conflicte amb la disponibilitat del recurs.
- En la Conca del Valira del Nord es satisfaran quasi totes les demandes sota els diferents escenaris tot i que presentarà algunes situacions conflictives sobretot durant l'estiu quan es considera l'escenari d'augment de temperatura de 4 °C (excloent cabals ecològics i la capacitat màxima de captació). Els escenaris que porten a més tensions en la disponibilitat i ús són els escenaris de referència (BAU on segueix la tendència actual) on la demanda serà superior de 71,9 % per l'escenari climàtic t4p-20 respecte al cabal i de 18,9 % per l'escenari climàtic t4p0 durant el mes d'agost. D'altra banda, l'escenari de major necessitat de neu de cultiu a les estacions d'esquí per mitigar els efectes de la reducció en la innivació degut al canvi climàtic la demanda serà superior al cabal en un 72 % (t4p-20) i un 19,3 % (t4p0) durant l'agost.
- La Conca del Valira d'Orient és la que presenta més conflictes possiblement per la competència entre les diferents demandes tant quan la temperatura augmenta 4 °C com 2 °C (major pes i intensitat del sector turístic i especialment durant els mesos d'hivern). Quan la temperatura augmenta 2 °C i la precipitació disminueix un 20 % les situacions de conflicte es donaran al gener sota els escenaris de referència (segueix la continuïtat actual) amb un augment de la demanda de 9,9 % respecte el cabal i l'escenari de producció de neu artificial amb un augment de la demanda del 23,7 % respecte al cabal. Si es considera un augment de la temperatura de 4 °C i una disminució de les precipitacions del 20 % els conflictes més importants es donaran pels mateixos escenaris, de referència i de producció artificial de la neu durant el mes de setembre amb un augment de la demanda d'aigua respecte el cabal del 119 % i 122 % respectivament.
- La Conca del Gran Valira no presentarà cap conflicte entre les diferents demandes i el recurs hídric sota els diferents escenaris considerats.

## 5.7. Referències

- Adeyeye, K., & Church, A. (2012). Water efficiency intervention strategies for domestic buildings. *CIBW062 Symposium*, (1), 477–488.
- Ahmad, S., & Simonovic, S. P. (2004). Spatial system dynamics: new approach for simulation of water resources systems. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 18(4), 331–340.
- Arranz, R., & McCartney, M. P. (2007). *Application of the Water Evaluation and Planning (WEAP) model to assess future water demands and resources in the Olifants Catchment, South Africa* (Vol. 116). IWMI.
- Assaf, H., Van Beek, E., Borden, C., Gijsbers, P., Jolma, A., Kaden, S., Kaltofen, M., Labadie, J. W., Loucks, D. P. & Quinn, N. W. T. (2008). Chapter thirteen generic simulation models for facilitating stakeholder involvement in water resources planning and management: a comparison, evaluation, and identification of future needs. *Developments in Integrated Environmental Assessment*, 3, 229–246.
- Barnard, P., Darkins, T., Earl, B. & Adeyeye, K. (2014). Retrofitting for water efficiency : A hotel case study. *Proceedings of the Water Efficiency Conference 2014*, (September 2014), 29–38.
- Beck, L., & Bernauer, T. (2011). How will combined changes in water demand and climate affect water availability in the Zambezi river basin?. *Global Environmental Change*. Elsevier Ltd . <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2011.04.001>
- Chinnasamy, P., Bharati, L., Bhattarai, U., Khadka, A., Dahal, V., & Wahid, S. (2015). Impact of planned water resource development on current and future water demand in the Koshi River basin, Nepal. *Water International*, 40(7), 1004–1020.
- Collet, L., Ruelland, D., Estupina, V. B., Dezetter, A., & Servat, E. (2015). Water supply sustainability and adaptation strategies under anthropogenic and climatic changes of a meso-scale Mediterranean catchment. *Science of the Total Environment*. Netherlands: Elsevier B.V . <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.07.093>
- Dawadi, S., & Ahmad, S. (2013). Evaluating the impact of demand-side management on water resources under changing climatic conditions and increasing population. *Journal of Environmental Management*. England: Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.10.015>
- De Graaf, I. E. M., Van Beek, L. P. H., Wada, Y. & Bierkens, M. F. P. (2014). Dynamic Attribution of Global Water Demand to Surface Water and Groundwater Resources:



- Effects of Abstractions and Return Flows on River Discharges. *Advances in Water Resources*. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2013.12.002>
- Flores-López, F., Galaiti, S. E., Escobar, M., & Purkey, D. (2016). Modeling of Andean páramo ecosystems hydrological response to environmental change. *Water (Switzerland)*, 8(3). <https://doi.org/10.3390/w8030094>
- Govern d'Andorra (2014). Procés d'adaptació d'Andorra al canvi climàtic (PAACC). [https://www.mediambient.ad/images/stories/PDF/PAACC/ProcesAdaptacioAndorra\\_CC2014.pdf](https://www.mediambient.ad/images/stories/PDF/PAACC/ProcesAdaptacioAndorra_CC2014.pdf)
- Govern d'Andorra (2018). Memòria del Pla sectorial d'infraestructures energètiques d'Andorra.
- Govern d'Andorra (2019). *Troisième Rapport Bisannuel à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC)*. <https://www.mediambient.ad/images/stories/CanviClimatic/CanviClimatic-AndorreCClimatiques.pdf>
- Govern d'Andorra (2020b). Departament d'estadística. <https://www.estadistica.ad/serveiestudis/web/index.asp>
- Govern d'Andorra (2020a). Ministeri de Medi Ambient i Sostenibilitat. Aigua - La despesa hídrica. <https://www.mediambient.ad/la-despesa-hidrica>
- Grouillet, B., Fabre, J., Ruelland, D., & Dezetter, A. (2015). Historical reconstruction and 2050 projections of water demand under anthropogenic and climate changes in two contrasted Mediterranean catchments. *Journal of Hydrology*. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.01.029>
- Hejazi, M., Edmonds, J., Clarke, L., Kyle, P., Davies, E., Chaturvedi, V., Wise, M., Patel, P., Eom, J., Calvin, K., Moss, R. & Kim, S. (2014). Long-term global water projections using six socioeconomic scenarios in an integrated assessment modeling framework. *Technological Forecasting and Social Change*. New York: Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2013.05.006>
- Höllermann, B., Giertz, S., & Diekkrüger, B. (2010). Benin 2025-Balancing Future Water Availability and Demand Using the WEAP "Water Evaluation and Planning" System. *Water Resources Management*, 24(13), 3591–3613. <https://doi.org/10.1007/s11269-010-9622-z>
- Jonch-Clausen, T. (2004). *Integrated water resources management (IWRM) and water efficiency plans by 2005: Why, what and how. Why, what and how.*

- <https://doi.org/10.1080/02508060408691775>
- Keller, F., Goyette, S., & Beniston, M. (2005). Sensitivity Analysis of Snow Cover to Climate Change Scenarios and Their Impact on Plant Habitats in Alpine Terrain. *Climatic Change*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.  
<https://doi.org/10.1007/s10584-005-5360-2>
- Larson, S. (2010). Understanding barriers to social adaptation: are we targeting the right concerns? *Architectural Science Review*, 53(1), 51–58.
- Le Bars, M., & Le Grusse, P. (2008). Use of a decision support system and a simulation game to help collective decision-making in water management. *Computers and Electronics in Agriculture*. Elsevier B.V.  
<https://doi.org/10.1016/j.compag.2008.01.003>
- Lévite, H., Sally, H., & Cour, J. (2003). Testing water demand management scenarios in a water-stressed basin in South Africa: application of the WEAP model. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 28(20–27), 779–786.  
<https://doi.org/10.1016/J.PCE.2003.08.025>
- Loucks, D. P. (2006). Generic simulation models for facilitating stakeholder involvement in water resources planning and management: a comparison, evaluation, and identification of future needs. In *Proceedings of the iEMSs third biennial meeting: "Summit on Environmental Modelling and Software", Burlington*.
- Mahmood, R., & Hubbard, K. G. (2002). Anthropogenic land-use change in the North American tall grass-short grass transition and modification of near-surface hydrologic cycle. *Climate Research*, 21(1), 83–90.
- Memon, F. A., & Butler, D. (2006). Water consumption trends and demand forecasting techniques. *Water Demand Management, 2006*, 1–26.
- Milano, M., Ruelland, D., Dezetter, A., Fabre, J., Ardoin-Bardin, S., & Servat, E. (2013). Modeling the current and future capacity of water resources to meet water demands in the Ebro basin. *Journal of Hydrology*, 500, 114–126.  
<https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2013.07.010>
- Pons, M. (2014). *Climate Change Impact on Winter Tourism in the Pyrenees and Adaptation Strategies*.
- Purkey, D. R., Huber-Lee, A., Yates, D. N., Hanemann, M., & Herrod-Julius, S. (2007). Integrating a climate change assessment tool into stakeholder-driven water management decision-making processes in California. *Water Resources*

- Management*, 21(1), 315–329.
- Raskin, P., Sieber, J., & Huber-Lee, A. (2001). Water Evaluation and Planning System: User guide for WEAP 21. *Tellus Institute, Boston, MA*, 15.
- Rayej, M. (2012). California future water demand projections (WEAP Model): Implications on energy demand. In *Water–Energy Conference. Shenzhen, China. Peking University* (p. 6).
- Reynaud, A., Pons, M., & Pesado, C. (2018). Household Water Demand in Andorra: Impact of Individual Metering and Seasonality. *Water*, 10(3), 321. <https://doi.org/10.3390/w10030321>
- Rochdane, S., Reichert, B., Messouli, M., Babqiqi, A., & Khebiza, M. Y. (2012). Climate Change Impacts on Water Supply and Demand in Rheraya Watershed (Morocco), with Potential Adaptation Strategies. *Water*, 4(4), 28–44. <https://doi.org/10.3390/w4010028>
- Schwanitz, V. J. (2013). Evaluating integrated assessment models of global climate change. *Environmental Modelling and Software*, 50(December 2013), 120–131. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.09.005>
- Sieber, J., & Purkey, D. (2015). WEAP-User Guide, Stockholm Environment Institute (SEI), Stockholm Environment Institute. US Center, Somerville, MA.
- Stave, K. A. (2003). A system dynamics model to facilitate public understanding of water management options in Las Vegas, Nevada. *Journal of Environmental Management*, 67(4), 303–313. [https://doi.org/10.1016/S0301-4797\(02\)00205-0](https://doi.org/10.1016/S0301-4797(02)00205-0)
- Steg, L., & Vlek, C. (2009). Encouraging pro-environmental behaviour: An integrative review and research agenda. *Journal of Environmental Psychology*, 29(3), 309–317.
- Stockholm Environment Institute. (2016). WEAP- TUTORIAL Water Evaluation And Planning System. *WEAP*, (August), 286.
- Stockholm Environment Institute (SEI), U. S. C. (2020). WEAP. <https://www.sei.org/projects-and-tools/tools/weap/>
- Sulis, A., & Sechi, G. M. (2013). Comparison of generic simulation models for water resource systems. *Environmental Modelling & Software*, 40, 214–225. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSOFT.2012.09.012>
- Travesset-Baró, O. (2017). Prospectiva energètica al Principat d'Andorra. Model integrat d'avaluació de la seguretat energètica per a la transició cap a un escenari sostenibilista. *TDX (Tesis Doctorals En Xarxa)*.

<http://www.tdx.cat/handle/10803/460913>

Weyant, J. (1995). Integrated Assessment of Climate Change: An Overview and Comparison of Approaches and Results. *Climate Change 1995: Economic and Social Dimensions of Climate Change*, (January), 367–439.

World Bank. (2017). Lesotho WEAP Manual, 33. <https://doi.org/10.1596/26026>

Yates, D., Sieber, J., Purkey, D., & Huber-Lee, A. (2005). WEAP21 A demand-, priority-, and preference-driven water planning model. Part 1: Model characteristics. *Water International*, 30(4), 487–500.

Zhang, Y., Gu, A., Lu, H., & Wang, W. (2017). Hydropower Generation Vulnerability in the Yangtze River in China under Climate Change Scenarios: Analysis Based on the WEAP Model. *Sustainability*, 9(11), 2085. <https://doi.org/10.3390/su9112085>

## **6. L'ADAPTACIÓ ALS IMPACTES DEL CANVI CLIMÀTIC EN EL RECURS HÍDRIC**

---

- 6.1. Adaptació al canvi climàtic**
- 6.2. Adaptació als impactes del canvi climàtic en el recurs hídric a Andorra**
  - 6.2.1. Percepció de la població de la vulnerabilitat i les estratègies d'adaptació**
- 6.3. Punts clau del capítol**
- 6.4. Referències**

## **6. L'ADAPTACIÓ ALS IMPACTES DEL CANVI CLIMÀTIC EN EL RECURS HÍDRIC**

---

### **6.1. Adaptació al canvi climàtic**

L'adaptació al canvi climàtic busca assegurar el benestar de les poblacions, la seguretat dels actius i el manteniment de béns, funcions i serveis ecosistèmics ara i en el futur. L'adaptació és específica del lloc i del context. Un primer pas cap a l'adaptació al futur canvi climàtic és reduir la vulnerabilitat i l'exposició a la variabilitat climàtica actual. La integració de l'adaptació a la planificació, inclosa la formulació de polítiques i la presa de decisions, pot promoure sinergies amb el desenvolupament i la reducció del risc de desastres.

La planificació i la implementació de les adaptacions es poden millorar mitjançant accions complementàries a diferents nivells, des dels individus fins als governs. Tot i així, poden existir una sèrie de restriccions que poden interactuar per impedir la planificació i implementació de l'adaptació. Les limitacions comunes a la implementació poden ser recursos financers i humans limitats, la integració o coordinació limitada del govern, les incerteses sobre els impactes projectats, diferents percepcions dels riscos, una absència de principals líders i defensors de les estratègies d'adaptació i eines limitades per supervisar l'eficàcia de l'adaptació. Una altra restricció inclou una investigació, un seguiment i observació insuficients i el finançament per mantenir-les (IPCC, 2014).

Existeixen beneficis importants, sinergies i compromisos entre mitigació i adaptació i entre diferents respostes d'adaptació. L'augment dels esforços per mitigar i adaptar-se al canvi climàtic impliquen una complexitat creixent d'interaccions, entre l'aigua, l'energia, l'ús del sòl i la biodiversitat. A més a més, les eines per comprendre i gestionar aquestes interaccions continuen sent limitades.

Les transformacions en decisions i accions econòmiques, socials, tecnològiques i polítiques poden millorar l'adaptació i promoure el desenvolupament sostenible. A nivell nacional, la transformació es considera més eficaç quan reflecteix les visions i

enfocaments propis d'un país per aconseguir un desenvolupament sostenible d'acord amb les seves circumstàncies i prioritats nacionals (IPCC, 2014).

Existeixen opcions d'adaptació a tots els sectors, però el seu context d'implementació i el potencial per reduir els riscos relacionats amb el clima difereixen entre sectors i regions. Algunes respostes d'adaptació comporten importants beneficis, sinergies i compromisos.

La gent, els governs i el sector privat comencen a adaptar-se a un clima canviant. Des del quart informe d'avaluació de l'IPCC (AR4), la comprensió de les opcions de resposta ha augmentat, amb un millor coneixement dels seus beneficis, costos i vincles amb un desenvolupament sostenible. L'adaptació pot adoptar diversos enfocaments segons el context que es tracti de reducció de vulnerabilitat, de la gestió dels riscos de desastres o la planificació de l'adaptació proactiva (IPCC, 2014). Aquests inclouen :

- desenvolupament d'infraestructures socials i ecològiques
- Optimització de processos tecnològics
- Gestió integrada de recursos naturals
- Canvi o reforç institucional, educatiu i de conducta
- Serveis financers
- Sistemes d'informació per donar suport a l'alerta precoç i a la planificació proactiva

Com a exemples d'estratègies d'adaptació tenim el cas dels Pirineus, on un dels problemes que s'enfronta en un futur a causa del canvi climàtic és la disponibilitat de la neu per al sector turístic. Una de les estratègies més esteses per compensar la variabilitat natural de la neu a les estacions alpines del Pirineu català ha estat l'augment de la producció de neu artificial en les darreres dècades. No obstant, aquesta ha estat qualificada de mala adaptació perquè pot crear problemes importants a nivell econòmic i ambiental (Barnett i O'Neill, 2010). Els partidaris de la producció de neu artificial defensen que la quantitat d'aigua que s'utilitza és baixa (l'equivalent al consum d'un dia per a una ciutat com Barcelona) i que més del 80 % de l'aigua que s'utilitza es retorna al medi alhora que compleixen estrictament les regulacions ambientals sobre els cabals residuals als rius. Pel que fa a l'energia, les comparacions amb el consum d'altres



modalitats turístiques (per exemple, avions que transporten turistes a destinacions del Carib) també mostren resultats favorables respecte a l'impacte d'altres destinacions. Els que s'oposen a aquesta pràctica defensen que calen grans quantitats d'aigua per fabricar neu i que l'aigua utilitzada pot ser retornada al medi en diferents condicions de qualitat i en diferents conques hidrogràfiques, cosa que pertorba els cabals naturals. L'altra gran preocupació és l'energia, ja que es diu que l'electricitat per fer neu pot representar més del 50 % del consum d'electricitat total de les estacions d'esquí catalanes. En aquest sentit, l'escassetat d'aigua i l'augment dels costos energètics podrien posar en perill la producció de neu artificial, fins i tot en l'absència d'un augment de la temperatura (Sauri i Llurdés, 2020).

Una altre exemple d'estratègia d'adaptació més fonamental, sobretot a mitjà i llarg termini, seria continuar la transició de les estacions d'esquí de temporada a estacions de muntanya obertes durant tot l'any. Aquesta estratègia no és nova, ja que abans de l'actual preocupació pel canvi climàtic, moltes estacions d'esquí ja buscaven alternatives fora de temporada. A més de mantenir i ampliar el ventall d'activitats relacionades amb la neu, les estacions han de buscar formes d'esport i esbarjo que no depenen de la neu però que encara puguin aprofitar l'atractiu ambiental de la muntanya (Sauri i Llurdés, 2020). En el cas d'Andorra, això s'ha fet durant uns quants anys oferint activitats esportives durant l'estiu (circuitos de bicicleta de muntanya, activitats esportives, rutes de senderisme, circuits d'aventura amb nens, tirolines, zones de jocs entre d'altres).

## **6.2. Adaptació als impactes del canvi climàtic en el recurs hídric a Andorra**

### **6.2.1. Percepció de la població de la vulnerabilitat i les estratègies d'adaptació**

Andorra és conscient dels efectes del canvi climàtic sobre el recurs hídric i ja fa uns anys que comença a fer estudis sobre els possibles impactes i les estratègies d'adaptació. El PAACC (de les sigles, Procés d'Adaptació d'Andorra al Canvi Climàtic) (Govern d'Andorra, 2014) s'emmarca en el conjunt d'actuacions realitzades pel Govern i amb la participació de la ciutadania i dels principals agents ambientals, socials i econòmics d'Andorra. Aquest pretén identificar els possibles impactes de canvi climàtic sobre els sectors socioeconòmics, valorar les vulnerabilitats de cadascun i definir les mesures d'adaptació adequades per fer front al canvi climàtic. Un dels diferents àmbits en el que es treballa és el de la gestió de l'aigua. Els participants a aquest document llisten



una sèrie d'impactes esperats, en la Taula 6.1 es poden veure els més rellevants classificats per ordre de prioritat.

Impactes	Descripció	Conseqüències	Prioritat
Disminució del recurs hídric	Increment de l'evapotranspiració a causa de la disminució de la precipitació i l'augment de la temperatura	Disminució del 14,9% al 2021-2050 (240 hm <sup>3</sup> /any) i del 37,6% al 2071-2100 (176 hm <sup>3</sup> /any) en relació al període 1961-1990 (282 hm <sup>3</sup> /any)	1
Pujada de la cota de neu	Augment de la necessitat d'aigua per fabricar neu en cotes més baixes	Més pressió sobre el recurs hídric i augment del consum d'energia	2
Aigua emmagatzemada en forma de neu	Reducció de la durada i el volum d'aquest emmagatzematge i modificació dels règims hidrològics	Reducció del caràcter nival dels rius, augment probable dels cabals hivernals, disminució de les puntes de desgel i avançament de l'inici del període de fusió de la neu	3
Problemes d'abastament d'aigua potable	Disminució de la quantitat d'aigua a causa de la disminució estacional de recurs		4
Qualitat de l'aigua	Disminució de la qualitat de l'aigua degut a la disminució dels cabals	Increment de la concentració de contaminants	5
Cabals naturals del riu	Disminució dels cabals naturals dels rius	Conseqüències sobre els ecosistemes aquàtics	6
Dèficits hídrics	Augment de la possibilitat de dèficits hídrics i de sequera	Més necessitat de reg i conseqüent increment de la pressió sobre el recurs hídric	7
Conflictes per l'ús de l'aigua	Disminució de la disponibilitat d'aigua i l'augment de la demanda provocaran un	augment de la competició entre diferents usos de l'aigua	8

Taula 6.1. Impactes esperats per al sector de la gestió de l'aigua d'Andorra. Font: Govern d'Andorra, 2014

També defineixen una sèrie de vulnerabilitats esperades per aquest sector que s'expliquen a continuació:

- **Vulnerabilitat del sector agro-ramader** per la baixa disponibilitat d'aigua.
- **Vulnerabilitat sector turístic d'hivern** (esquí) per la manca de disponibilitat d'aigua

- **Vulnerabilitat de l'economia pública** per a fer front a l'increment de les despeses associades al tractament d'aigua, davant la possible disminució de la seva qualitat i quantitat.
- **Vulnerabilitat de l'economia pública i de l'economia del consumidor** per assumir l'augment de la despesa del subministrament d'aigua potable a la llar, en el cas que les empreses subministradores incrementin el cànon associat al tractament de l'aigua garantir-ne la qualitat.
- **Vulnerabilitat del recurs hídric** a la disminució de la precipitació i a l'augment de la temperatura veient afectada la quantitat i qualitat del recurs
- **Vulnerabilitat del recurs hídric i del sector hidroelèctric** davant les variacions en la disponibilitat del recurs.
- **Vulnerabilitat de l'estat ecològic dels sistemes aquàtics** per a la disminució de la quantitat i qualitat de l'aigua.
- **Vulnerabilitat de la gestió del territori** (públics o privats) en relació als riscos naturals

Aquest grup de treball també proposa una sèrie de mesures d'adaptació que es llisten a continuació. Aquestes mesures són indicatives i s'haurien d'estudiar amb més detall per avaluar-ne la viabilitat i l'aplicació a Andorra.

- **Impulsar un Pla general de l'aigua**, per a potenciar la sensibilització sobre la manca i la necessitat d'estalvi de l'aigua.
- **Limitació del creixement urbanístic**, créixer de forma més sostenible en funció de la disponibilitat de recursos. Regulació de criteris de construcció urbanística de cara al foment de l'estalvi i l'eficiència de l'aigua. Evitar el constant creixement de la impermeabilització del sòl.
- **Reduir el consum i les pèrdues d'aigua**, revisant la xarxa i les canalitzacions, impulsant mesures de canalització i regadiu més eficients per a l'agricultura, aplicant canvis en les tarifes per sensibilitzar a la població i reduir el consum (aplicació d'una taxa/quota de l'aigua), una aplicació de mòbil per controlar el consum d'aigua, el control del consum d'aigua pels turistes instal·lant comptadors als hotels, entre altres).
- **Elaboració d'un Pla Estratègic d'embassaments**, que incorpori un estudi de les eventuais necessitats de regulació de cabals.

- **Revisió del marc legal de l'aigua** en termes de propietat de l'aigua superficial i també subterrània, fomentant una gestió més concertada i participativa de l'aigua que permeti una gestió de la competència i la resolució de conflictes, davant una disminució de la disponibilitat de l'aigua degut a la disminució de la precipitació i l'augment de la temperatura.
- **Impulsar la recollida de les aigües pluvials i la reutilització d'aigües** per a rec.
- **Potenciar i fomentar la producció d'energies sostenibles pròpies** per a diversificar les fonts d'energia i ser menys dependents de la disponibilitat d'aigua per a generar energia hidroelèctrica.
- **Impulsar un Pla estratègic Blanc-Verd**, per començar a orientar un país que viu de la neu cap a un país que viu i valora la natura.
- **Incorporació dels nous riscos i impactes al mapa de riscos i cartografiar-los**, per tal de reduir la vulnerabilitat del territori a la disminució de la disponibilitat de l'aigua i a l'increment dels fenòmens meteorològics extrems.

D'altra banda, en el marc de la tesi i del projecte Piragua (PIRAGUA (EFA210/16/PIRAGUA), 2020) que se centra en l'estudi del canvi climàtic i el seu impacte en el recurs hídric dels Pirineus, es vol estudiar i tenir en compte l'opinió de la població d'Andorra a l'hora d'elaborar estratègies d'adaptació al canvi climàtic amb l'objectiu de minimitzar els seus impactes sobre el recurs hídric. Aquest procés participatiu s'ha fet mitjançant una enquesta online (podeu consultar l'enquesta completa a l'Annex 2).

L'enquesta es va realitzar entre octubre i novembre del 2020 i ha comptabilitzat un total de 98 entrades. Si analitzem els resultats del total d'enquestats un 54 % són homes, un 44,9 % dones i un 1 % altres. D'aquests, la mitjana d'edat dels enquestats se situa entre els 30-50 anys. S'obté la representació dels diferents grups d'edat i parròquies del país (Figura 6.1).

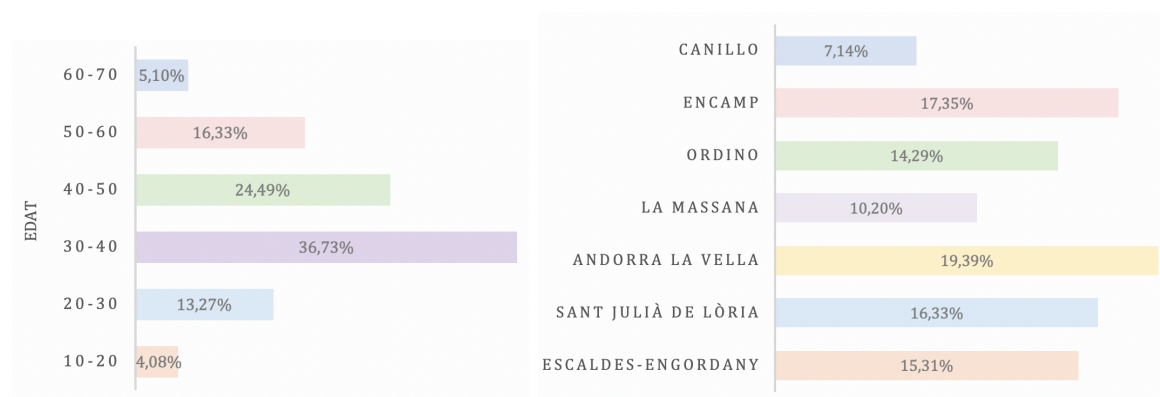


Figura 6.1. Edat i parròquia on viuen els enquestats. Font: Elaboració pròpia

Pel que fa a la percepció del canvi climàtic, gairebé la majoria de la gent (89 %) hi creu fermament i creu que s'ha d'actuar mentre que un 10 % encara té dubtes (Figura 6.2). La majoria consideren que es tracta d'un canvi forçat per l'activitat humana mentre que únicament un 10 % pensa que és la causa d'un canvi natural i un canvi forçat per l'activitat humana (Figura 6.3).

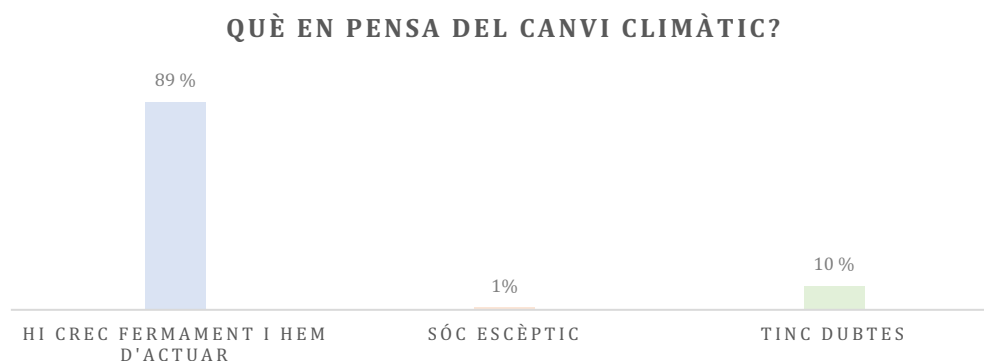


Figura 6.2. Percepció dels enquestats sobre el canvi climàtic. Font: Elaboració pròpia

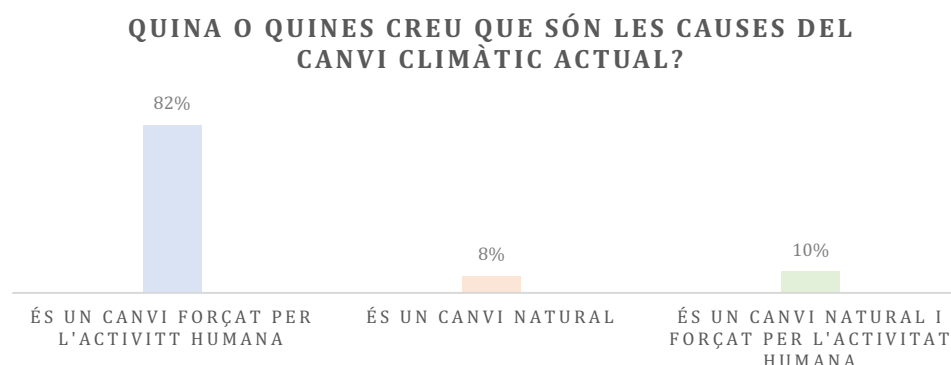


Figura 6.3. Percepció dels enquestats sobre les causes del canvi climàtic. Font: Elaboració pròpia

Pel que fa als efectes del canvi climàtic sobre el recurs hídric a Andorra tenim aproximadament un 50 % de gent que creu que disminuirà la qualitat de l'aigua i el cabal

dels rius. Un 90 % creu que augmentarà l'altitud de la cota de neu i un 77 % que augmentarà el risc d'inundacions (Figura 6.4).

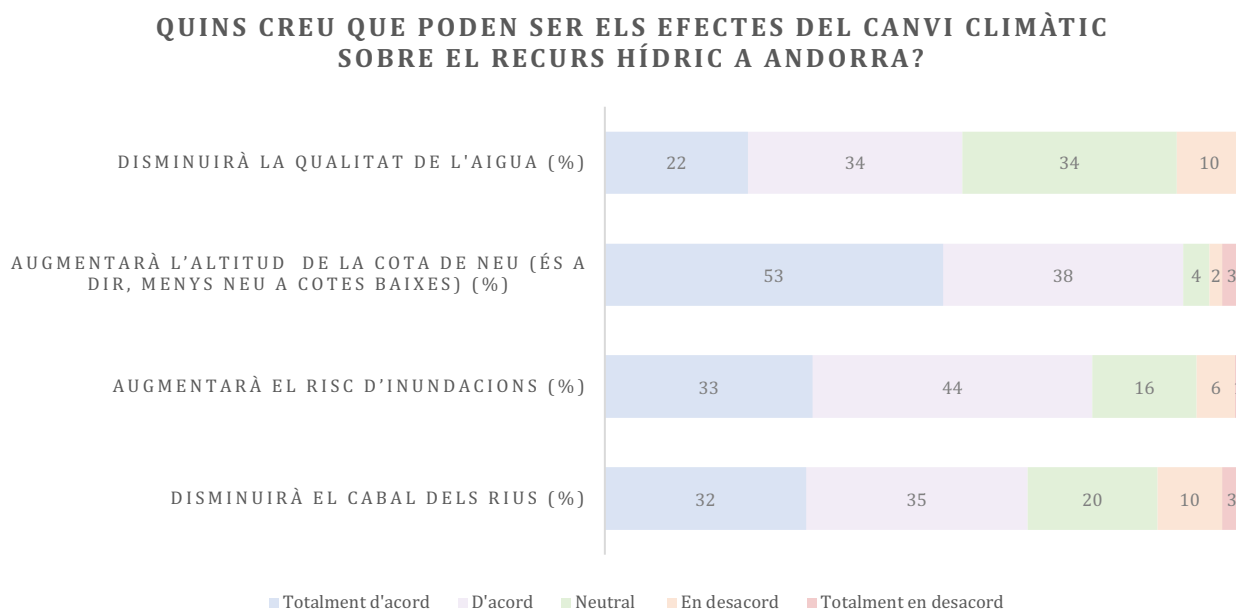


Figura 6.4. Percepció dels enquestats dels efectes del canvi climàtic sobre el recurs hídric. Font: Elaboració pròpia

Pels usos de l'aigua a Andorra, els enquestats situen el sector dels serveis en primer lloc seguit del sector domèstic, la producció de neu artificial, la producció d'energia hidroelèctrica i deixant en última posició l'agricultura (Figura 6.5).

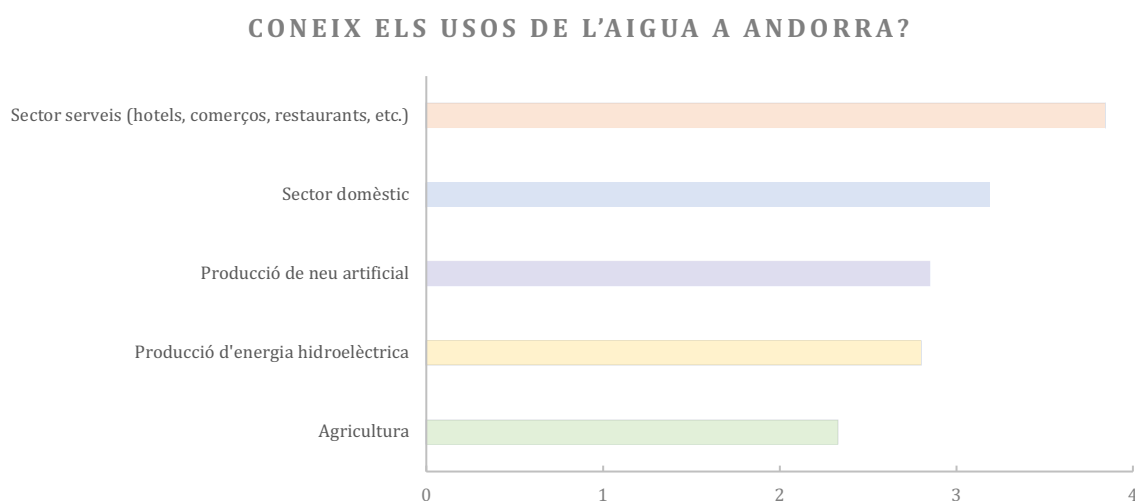


Figura 6.5. Percepció dels enquestats sobre els usos de l'aigua a Andorra. Font: Elaboració pròpia

Pels usos de l'aigua a Andorra, els enquestats, amb un 41% situen el sector dels serveis i un 22 % el sector de l'energia hidroelèctrica en primer lloc. En segon lloc, amb un 24 %

situen el sector dels serveis, amb un 23 % el sector domèstic i un 21 % el sector de la producció de neu artificial. En tercer lloc situen la producció de neu artificial amb un 25 % seguit de la producció d'energia hidroelèctrica i el sector domèstic amb un 18 %. Un 26 % situen el sector domèstic i un 24 % la producció de neu artificial. I finalment, un 35 % dels enquestats situa l'agricultura en cinquè lloc seguit de la producció d'energia hidroelèctrica amb un 28 % (Taula 6.2).

	1	2	3	4	5	Puntuació mitjana
Sector serveis (hotels, comerços, restaurants, etc.)	40	24	20	6	8	3,84
Sector domèstic	21	23	18	26	10	3,19
Producció de neu artificial	11	21	25	24	17	2,85
Producció d'energia hidroelèctrica	22	11	18	19	28	2,8
Agricultura	4	19	17	23	35	2,33

Taula 6.2. Classificació i puntuació mitjana segons les respostes dels enquestats dels usos de l'aigua a Andorra. Font: Elaboració pròpia

En la figura 6.6 s'observa que en realitat el màxim consumidor d'aigua és la producció d'energia hidroelèctrica amb un 86 % tot i que es tracti d'un ús no consumptiu. El 10 % correspon al consum domèstic (on la llar ocupa un 70 %, els serveis un 12 % i el 17 % correspon a altres consums comunals, comerços) i al voltant del 3 % per a l'agricultura i la producció de neu. La resta d'activitats (termalisme, aqüicultura, industrial) han consumit un total d'un 1% (Govern d'Andorra, 2018). Com a despeses consumptives hi englobem els consums d'aigua domèstica (hotels, llars, tallers, etc.), els consums en agricultura i ramaderia i els consums d'aigua termal.

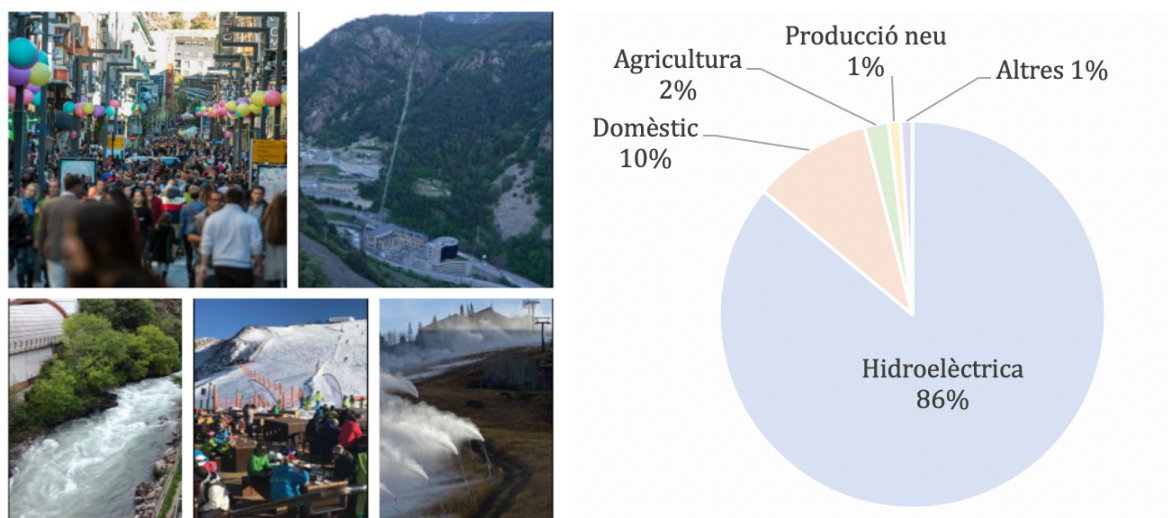


Figura 6.6. Fotografies dels diferents usos de l'aigua a Andorra. Font: PIRAGUA (EFA210/16/PIRAGUA) (2020). Distribució de la despesa hídrica segons les dades de l'informe del Govern d'Andorra. Font: Govern d'Andorra, 2018a

Referent al preu de l'aigua, un 91% dels enquestats no coneix el preu a Andorra, un 84 % no coneix el que consumeix a casa seva i el 61 % no coneix el que paga d'aigua a la seva llar (Figura 6.7). Això té una clara explicació, a Andorra l'usuari final no rep cap tipus de factura del seu consum d'aigua. Aquesta és comuna per a tot usuari ja es tracti d'una casa individual com d'un bloc de pisos i la factura la sol rebre el propietari. Els individus que resideixen en apartaments dins un mateix edifici sovint pagaran la factura a través de les agències immobiliàries i com a « despeses » sense tenir accés al preu de l'aigua ni al consum del mateix. Destacar també que la majoria d'edificis disposen de comptadors conjunts per a tots els edificis i en l'actualitat no existeixen comptadors individuals per apartament en la majoria dels casos.

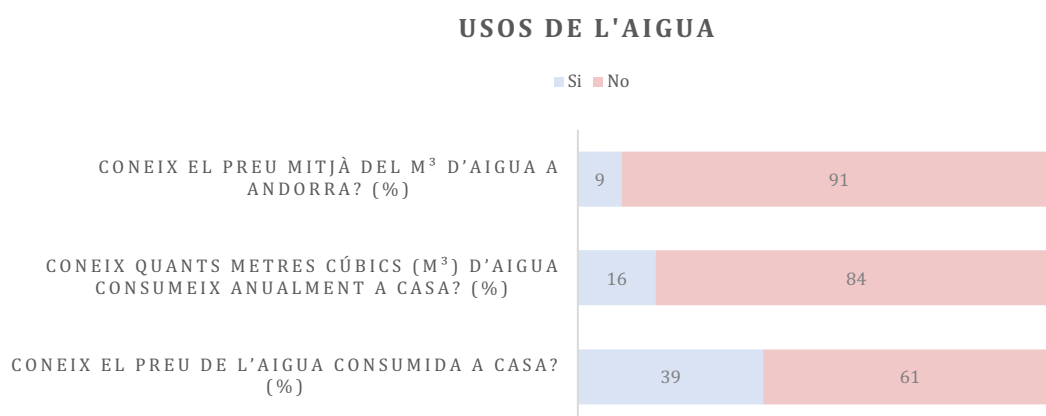


Figura 6.7. Percepció dels enquestats sobre el preu de l'aigua a Andorra. Font: Elaboració pròpia

Pel que fa al preu del m<sup>3</sup> d'aigua consumida a Andorra, el 27 % dels enquestats situen aquest valor entre 0 i 0,5 €/m<sup>3</sup>, un 14 % entre 0,5 i 1,5 €/m<sup>3</sup>, un 8 % entre 1,5 i 2,5 €/m<sup>3</sup> un 23 % entre 2,5 i 5 €/m<sup>3</sup> i la resta creu pagar més de 5 €/m<sup>3</sup> (Figura 6.8). Si s'observen els valors actuals (Figura 6.9) a Europa es paga 2,8 €/m<sup>3</sup>, a Espanya 1,72 €/m<sup>3</sup> i el preu de l'aigua a Andorra es de 0,95 €/m<sup>3</sup>. Per tant, un 41 % dels enquestats s'aproxima al preu que es paga per l'aigua a Andorra.

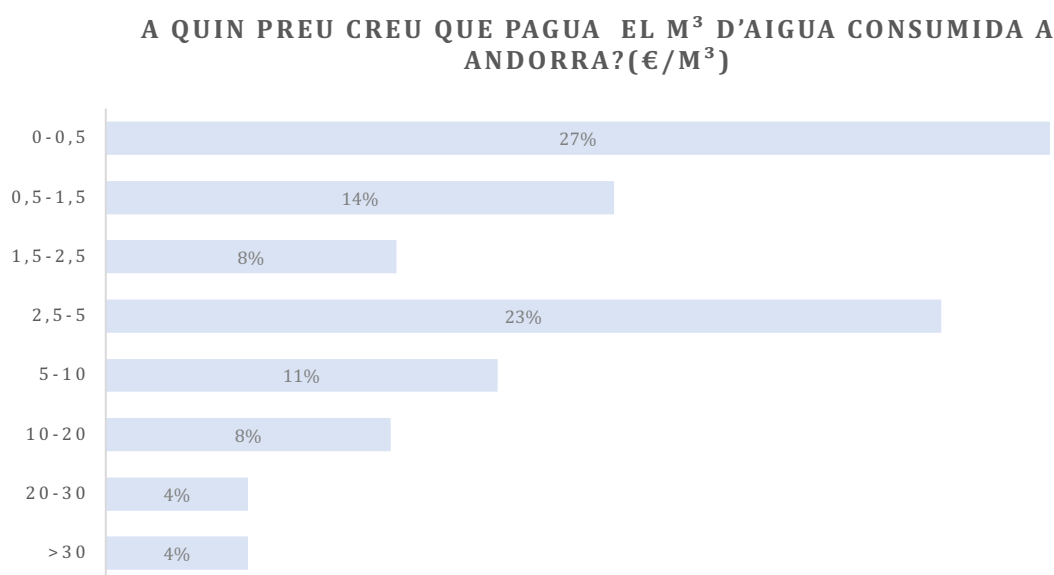


Figura 6.8. Percepció dels enquestats sobre el preu del m<sup>3</sup> d'aigua a Andorra. Font: Elaboració pròpia

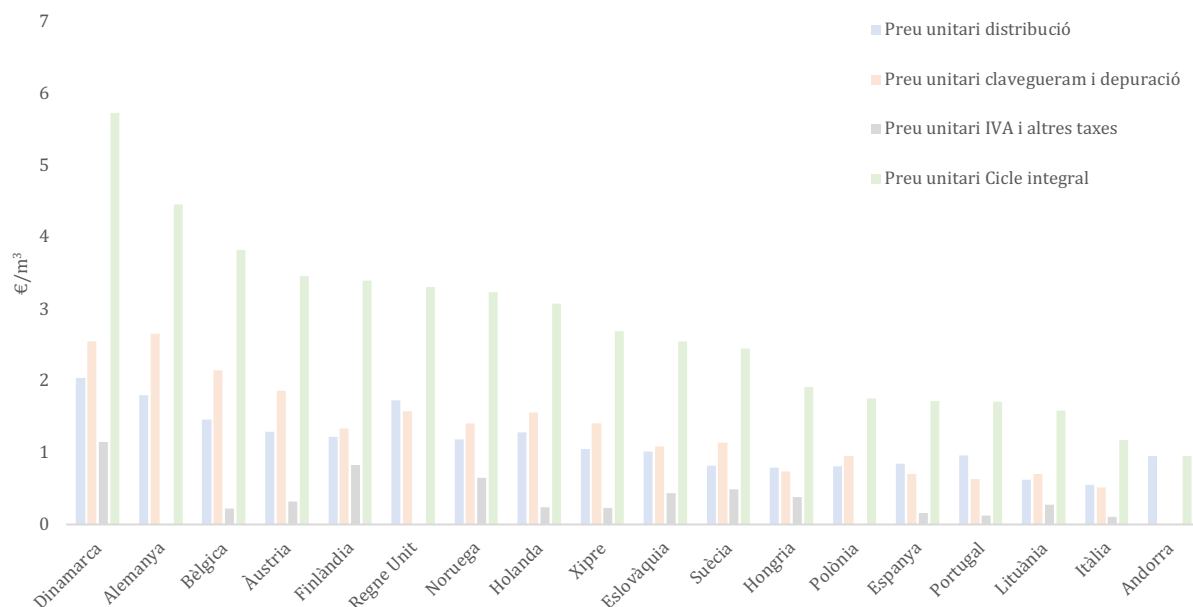


Figura 6.9. Comparatiu entre països dels costos del cicle de l'aigua. Font: European Environment Agency, 2013



Finalment l'enquesta se centra en les estratègies d'adaptació al canvi climàtic. En primer lloc, els enquestats consideren que s'hauria de donar prioritat d'accés a l'aigua al sector domèstic, seguit de l'agricultura i la producció d'energia hidroelèctrica i deixant en últim lloc la producció de neu artificial (Figura 6.10 i Taula 6.3).

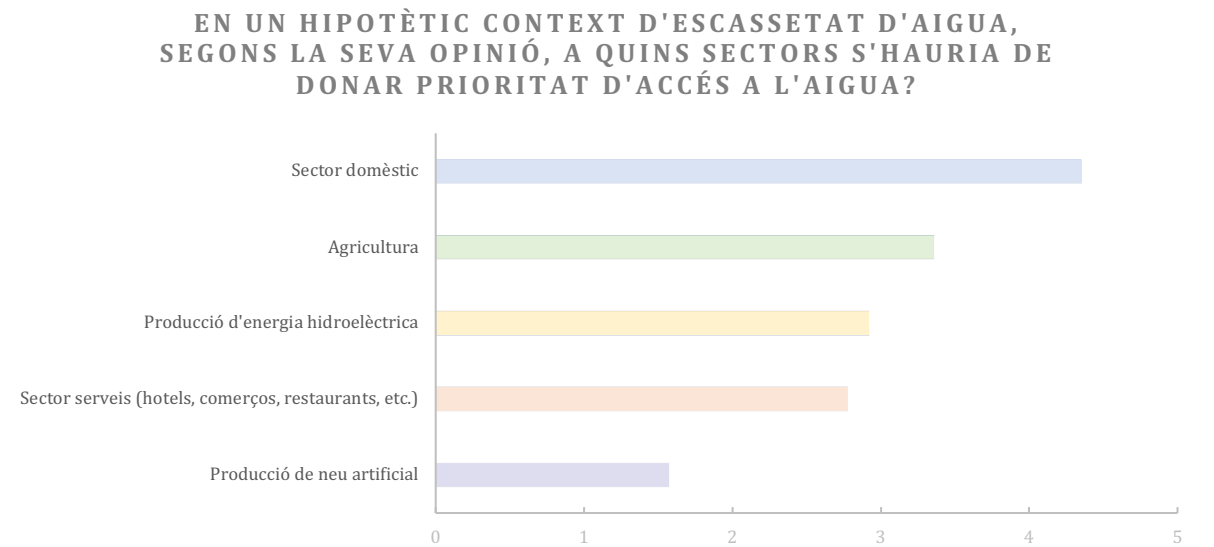


Figura 6.10. Percepció dels enquestats sobre els sectors a prioritzar en cas d'escassetat d'aigua. Font: Elaboració pròpia

	1	2	3	4	5	Puntuació mitjana
Sector domèstic	61	20	11	6	1	4,35
Agricultura	15	31	32	14	6	3,36
Producció d'energia hidroelèctrica	20	18	14	27	18	2,92
Sector serveis (hotels, comerços, restaurants, etc.)	2	22	32	35	7	2,77
Producció de neu artificial	1	6	9	16	67	1,57

Taula 6.3. Classificació i puntuació mitjana segons les respostes dels enquestats sobre els sectors que s'haurien de prioritzar a l'accés a l'aigua a Andorra. Font: Elaboració pròpia

### QUINES DE LES SEGÜENTS MESURES D'ADAPTACIÓ AL CANVI CLIMÀTIC PROPOSADES CONSIDERA PRIORITÀRIES? (%)

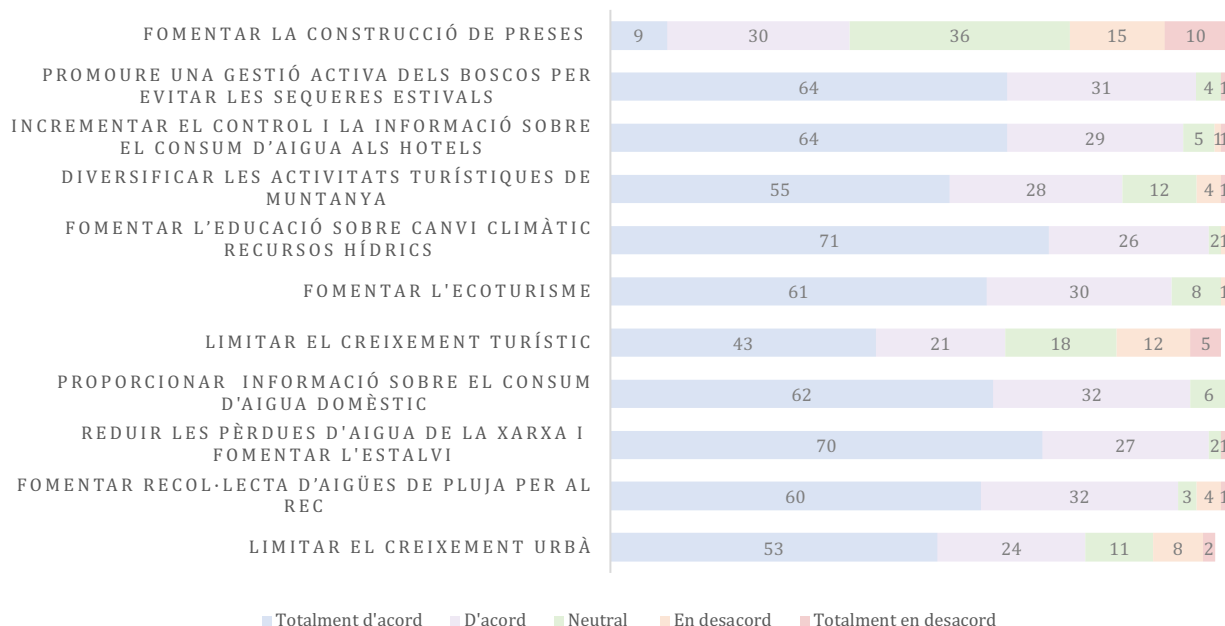


Figura 6.11. Percepció dels enquestats sobre les mesures d'adaptació al canvi climàtic. Font: Elaboració pròpia

La majoria dels enquestats consideren prioritàries entorn al 50-60 % la majoria de les mesures d'adaptació al canvi climàtic proposades a excepció de la construcció de preses. Les tres mesures que consideren més necessàries són reduir les pèrdues d'aigua a la xarxa i fomentar l'estalvi en tots els sectors, limitar el creixement urbà i fomentar l'educació sobre el canvi climàtic i el recurs hídric. També consideren importants (vora el 40-50 %) promoure una gestió activa dels boscos per evitar les sequeres estivals, diversificar les activitats turístiques de muntanya per ser més independents de la neu i limitar el creixement turístic. Una dada sorprenent és que no es considera prioritari tenir més informació sobre el consum d'aigua domèstic (Figura 6.11 i 6.12).

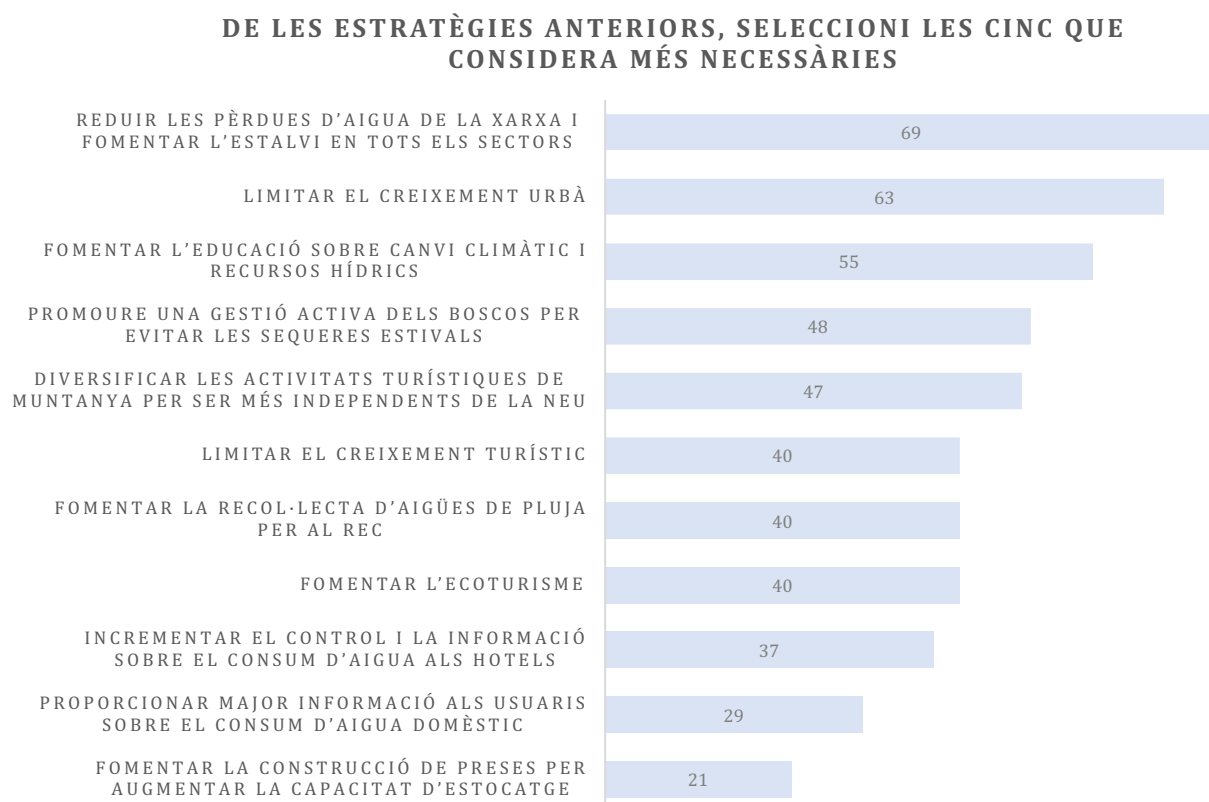


Figura 6.12. Percepció dels enquestats sobre les estratègies d'adaptació. Font: Elaboració pròpia

Finalment, els enquestats han fet una sèrie de proposicions sobre possibles estratègies d'adaptació al canvi climàtic aplicables a Andorra, són les següents :

- Establir un mínim vital del preu pel consum d'aigua, tot el que es consumeixi a partir d'aquest límit s'hauria d'incrementar el preu.
- Incentivar l'estalvi d'aigua i energia amb bonificacions en les factures
- Fomentar l'educació sobre el canvi climàtic i el recurs hídric
- Ciutats més verdes per minimitzar l'impacte de la radiació solar sobre el ciment.
- Revisió de les edificacions en risc d'inundació, despreniments, allaus, entre altres. Regulació estricta de la construcció en entorns naturals i de patrimoni cultural
- Reutilització de les aigües residuals (Neteja de carrers amb aigua reutilitzada, etc.)
- Aplicar una taxa ecoturística
- Fomentar l'ús de productes domèstics i industrials líquids no contaminants (productes de neteja, desinfectants, desembossadors, entre altres).
- Crear mini-centrals hidroelèctriques
- Limitar el creixement de la població i del turisme
- Liderar la recerca per a la lluita del canvi climàtic

- Protegir més els rius, major estocatge d'aigua en embassaments o a la muntanya
- Recollida de l'aigua de pluja en dipòsits, tant a les cases com edificis comunitaris
- Fomentar l'estalvi d'aigua, disposar de comptadors individuals d'aigua per conèixer el consum
- Fer pagar més cara l'aigua
- Taxa climàtica

Un dels factors claus en el desenvolupament d'estratègies d'adaptació és el grau d'acceptació i d'adopció de la població ja que en moltes d'elles el grau d'èxit depèn d'aquest factor d'adopció o d'acceptació social en el cas de mesures on les administracions o el sector privat tenen més pes. El fet de realitzar una enquesta per conèixer el que la gent pensa sobre el canvi climàtic, el recurs hídric i l'adaptació ja siguin experts o la població en general, permet tenir una primera aproximació, tot i que no de precisió (no era l'objectiu en el seu disseny). Ajuda a l'hora d'identificar i analitzar les possibles estratègies que puguin ser aplicades a Andorra però també que siguin acceptades per la població i, per tant, tinguin una major probabilitat d'èxit i d'impacte positiu. Destacar que la gent està força conscienciada que el canvi climàtic és una realitat i que s'ha d'actuar per a minimitzar-ne els danys i adaptar-se de la millor manera possible. Per tant, si s'informa correctament a la població, aquesta acceptarà millor la implementació d'estratègies que permetin conservar el recurs hídric.

### **6.3. Punts clau del capítol**

- És important reduir els impactes del canvi climàtic per reduir la vulnerabilitat del recurs hídric a partir de la integració de l'adaptació a la planificació, a la gestió, a la presa de decisions, entre altres.
- Cal implementar accions tant a nivell de mesures de l'administració pública com mesures per fomentar el canvi d'hàbits de la població així com promoure la recerca per conèixer i gestionar millor el recurs i la demanda hídrica i poder dissenyar de forma més objectiva i acurada les estratègies de gestió sostenible del recurs hídric.
- El primer procés participatiu d'adaptació al Canvi climàtic (PAAC) que va realitzar el Govern d'Andorra va identificar entre diferents actors del territori els impactes esperats sobre el recurs hídric.

- Els actors consultats van afirmar que esperen una disminució del recurs, la pujada de la cota de neu, la reducció de la durada i el volum de l'aigua emmagatzemada en forma de neu, la disminució de la qualitat de l'aigua, l'augment del dèficit hídric i de sequera i els conflictes per als diferents usos de l'aigua.
- Els actors van identificar els sectors agroramader, el sector turístic d'hivern i el sector de les hidroelèctriques com els més vulnerables.
- Una enquesta posterior realitzada a una mostra de la població en el marc de la tesi situa la percepció que el sector dels serveis i domèstic són els màxims consumidors d'aigua tot i que en realitat el màxim consumidor és la producció d'energia hidroelèctrica seguit del sector domèstic.
- Un 91 % de les persones enquestades desconeix el preu del m<sup>3</sup> d'aigua, un 84 % la quantitat que n'utilitza a casa i el 61 % el que paga en aquest concepte. Això és degut a la falta d'informació, l'usuari final a Andorra no rep cap tipus de factura.
- Pel que fa a les estratègies d'adaptació, els enquestats consideren prioritàries la majoria de les mesures proposades, les que consideren més necessàries són reduir les pèrdues d'aigua a la xarxa, fomentar l'estalvi en tots els sectors, limitar el creixement urbà i fomentar l'educació sobre el canvi climàtic i el recurs hídric. Una dada sorprenent és que no es considera prioritari tenir més informació sobre el consum d'aigua domèstic.

#### 6.4. Referències

Barnett, J., & O'Neill, S. (2010). *Maladaptation*. Pergamon.

European Environment Agency (2013). *Assessment of cost recovery through water pricing*. <https://doi.org/10.2800/93669>

Govern d'Andorra (2014). Procés d'adaptació d'Andorra al canvi climàtic (PAACC). [https://www.mediambient.ad/images/stories/PDF/PAACC/ProcesAdaptacioAndorra\\_CC2014.pdf](https://www.mediambient.ad/images/stories/PDF/PAACC/ProcesAdaptacioAndorra_CC2014.pdf)

Govern d'Andorra (2018). Estudi per a l'elaboració anyal de l'inventari i quantificació de la despesa hídrica per usos del Principat d'Andorra. <https://www.mediambient.ad/images/stories/PDF/aigua/Despesa-hidrica-Any-2018.pdf>

- IPCC (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Vol. 9781107025). <https://doi.org/10.1017/CBO9781139177245.003>
- PIRAGUA (EFA210/16/PIRAGUA) (2020). *Document intern del projecte PIRAGUA*.
- Sauri, D., & Llurdés, J. C. (2020). Changement climatiques et stratégies d'adaptation dans les stations de ski catalanes espagnoles. *Revue de Géographie Alpine*, (108-1), 0-16. <https://doi.org/10.4000/rga.6782>

## **7. DISCUSSIÓ I CONCLUSIONS**

---

### **7.1. Discussió**

### **7.2. Conclusions**

### **7.3. Futures línies de recerca i desenvolupament**

### **7.4. Referències**

## 7. DISCUSSIÓ I CONCLUSIONS

---

### 7.1. Discussió

L'aigua és un recurs essencial per als éssers vius, inclosos els éssers humans que utilitzen l'aigua per al consum propi així com per a multitud de les activitats econòmiques que permeten el desenvolupament social i territorial (García-Ruiz, López-Moreno, Vicente-Serrano, Lasanta-Martínez i Beguería, 2011a). La demanda d'aigua ha anat augmentant contínuament a causa del creixement i el desenvolupament de la població, en canvi, la disponibilitat d'aquest recurs s'espera que pateixi una tendència cap a la disminució (García-Ruiz i Lana-Renault, 2011b; López-Moreno et al., 2014). Les activitats de desenvolupament humà i el canvi global junt amb el canvi climàtic condueixen a la degradació de la qualitat i quantitat de l'aigua disponible (López-Moreno, Beniston i García-Ruiz, 2008).

Andorra és una zona d'alta muntanya i els rius mostren una forta estacionalitat amb pics de cabal durant la primavera degut a la fosa de neu i cabals baixos durant l'hivern coherent amb el que s'ha identificat en altres zones del Pirineu (López-Moreno et al., 2014; Tague i Peng, 2013). En l'actualitat es disposa de suficient recurs hídric per arribar a satisfer les demandes presents però els resultats de la tesi mostren que amb una tendència de continuïtat de creixement, l'escenari es complica, el que obligarà a prendre decisions de prioritització i/o de gestió més sostenible del recurs per a evitar conflictes puntuals entre les diferents demandes en un futur. Els resultats mostren en primer lloc una sèrie de projeccions que preveuen una disminució dels cabals a l'horitzó 2050. Es preveu una disminució del cabal mig anual de 8,5 %, 14 %, 36 % i 40,5 % pels escenaris t2p0, t4p0, t2p-20 i t4p-20 i un augment del cabal de 24 % i 16 % pels escenaris t2p20 i t4p20 (essent el valor després de t i de p el canvi en la temperatura mitjana i la precipitació en dit escenari). Aquesta disminució del cabal és més important durant la primavera alhora que també es produirà un avançament temporal del pic de cabal màxim degut a la fosa prematura de la coberta permanent de neu en consonància amb el que constaten estudis previs com els de López-Moreno i García-Ruiz (2004) i Senatore, Mendicino, Smiatek i Kunstmann (2011). Aquest



avançament es preveu que sigui aproximadament d'un mes, passant del juny al maig. De la mateixa manera, tots els escenaris experimenten lleugers augments de cabal durant els mesos d'hivern, principalment pels efectes dels canvis de la temperatura en la dinàmica nival. Aquesta tendència que ja ha estat remarcada en altres zones en els últims anys per Alpert, Krichak, Shafir, Haim i Osetinsky (2008) on un augment de la temperatura d'entre 1-2 °C provoca un augment de la precipitació en forma líquida i una disminució de les nevades resultant-ne un augment del cabal hivernal, una fusió més primerenca de la neu i una reducció del cabal estival (López-Moreno i García-Ruiz, 2004; Senatore et al., 2011). És important tenir en compte també els canvis associats en els usos del sòl que provocaran un augment de l'evapotranspiració i com a conseqüència una disminució dels cabals (Lepinas, Ludwig i Heussner, 2010). En aquest estudi, els efectes del canvi en els usos del sòl sobre el recurs hídric mostren que el cabal disminuirà, aquests resultats són coherents amb els resultats dels estudis de García-Ruiz i Lana-Renault (2011b); García-Ruiz et al. (2011a); López-Moreno et al. (2011); Vicente-Serrano, Lasanta i Romo (2004); Warburton, Schulze i Jewitt (2012); Weatherhead i Howden (2009), tot i així, disminuiran de forma menys significativa que els canvis en el clima. Per exemple, els escenaris AFOR+t2p0, FIREFOR+t2p0 i MANAGEFOR+t2p0 preveuen una disminució del cabal d'un 8,5 %, 4,6 % i 4 % respectivament. La disminució més significativa es dona quan el bosc guanya terreny (AFOR), tendència més observada dels darrers anys degut a l'abandonament dels cultius i pastures que s'han donat en alta muntanya i en coherència amb estudis com el de García-Ruiz et al. (2011a), que detecten la mateixa tendència. D'altra banda, un escenari que permetria mitigar els impactes de la disminució del cabal seria el MANAGEFOR que preveu un increment de la fracció gestionada de la superfície forestal minimitzant les disminucions de cabals degudes al canvi climàtic.

Pel que fa a la demanda d'aigua, aquesta augmentarà en coherència amb l'estudi de Vörösmarty i Sahagian (2000) per a tots els escenaris excepte per a l'escenari de decreixement combinat amb un escenari climàtic d'augment de +2°C de la temperatura mitjana. L'augment més important, doblant els valors actuals de la demanda actual, es donarien sota els escenaris de futur augment de la producció de neu artificial per mitigar els efectes del canvi climàtic sobre la disponibilitat de neu en estacions d'esquí i per l'escenari de continuïtat combinat amb un escenari climàtic d'increment de la

temperatura mitjana de 4 °C. En aquests casos, quan la temperatura augmenta 4°C, la demanda total anual variaria de 3,10 Mm<sup>3</sup> el 2015 a 7,74 Mm<sup>3</sup> i 7,69 Mm<sup>3</sup> respectivament per la Conca del Gran Valira, de 1,65 Mm<sup>3</sup> el 2015 a 4,33 Mm<sup>3</sup> i 4,29 Mm<sup>3</sup> respectivament per la Conca del Valira del Nord i de 4,78 Mm<sup>3</sup> el 2015 a 11,12 Mm<sup>3</sup> i 10,76 Mm<sup>3</sup> respectivament per la Conca del Valira d'Orient a l'horitzó 2050.

Aquesta variació projectada en una disminució dels cabals tindrà un efecte sobre el recurs disponible i, per tant, sobre la capacitat de satisfer les futures demandes creixents sectorials d'aigua podent arribar a entrar en situacions d'estrès i conflictes en determinats llocs i determinats moments de l'any. El model WEAP ha permès poder estimar l'evolució d'aquestes diferents demandes a l'horitzó 2050 i veure la seva resposta quan s'apliquen canvis climàtics, canvis d'usos del sòl o canvis en l'evolució socioeconòmica com poden ser canvis en el creixement poblacional o l'activitat turística, canvis en els patrons de consum d'aigua domèstic o canvis en la producció de neu artificial. A escala global, i considerant les tres conques hidrològiques, es disposa de suficient recurs per satisfer les demandes a l'horitzó 2050. No obstant, si s'analitzen les conques en detall s'observen que les conques més petites del Valira del Nord i del Valira d'Orient poden presentar episodis de conflicte entre la disponibilitat del recurs hídic i les demandes d'aigua. Per la Conca del Valira del Nord, les demandes podran ser satisfetes a excepció d'alguns mesos i sota diferents escenaris socioeconòmics quan es considera un augment de la temperatura de 4 °C (independentment del canvi projectat en la precipitació). Els conflictes es donaran sobretot a l'estiu, entre els mesos de juliol i setembre, per a l'escenari de referència o de continuïtat (es segueixen les tendències actuals a nivell de població i activitat econòmica), en el de futur creixement de la producció de neu a les estacions d'esquí (per mitigar el dèficit d'innivació natural) i tot i que en menor mesura també en els escenaris de decreixement i eficient. Mentre que durant l'hivern només en els escenaris de continuïtat i de producció de neu artificial donaran situacions de conflicte durant el mes de febrer. La Conca del Valira d'Orient presenta més conflictes possiblement per la competència entre les diferents demandes ja que s'observa un major pes i intensitat del sector turístic especialment durant els mesos d'hivern. En aquest cas, tant en l'escenari d'augment de la temperatura de 4 °C com el de 2 °C, aquest últim només combinat amb una disminució de -20% de la precipitació, en resulten

demandes no satisfetes durant alguns mesos d'hivern, principalment durant el mes de gener i els mesos d'estiu.

Cal destacar que els escenaris eficient i de decreixement, permeten contrarestar les disminucions de recurs degut al canvi climàtic en la majoria d'escenaris. No obstant, en els casos més extrems d'increment de temperatura de 4 °C combinat amb una variació de la precipitació de 0 % i de -20 %, també presenten puntualment, tot i que en menor mesura, alguns episodis de conflicte durant alguns mesos d'estiu i d'hivern.

Aquests resultats permeten per primer cop donar un valor objectiu al signe i a la magnitud dels efectes del canvi climàtic a mig termini sobre el recurs hídric a Andorra. D'altra banda, en un context de canvi global, el canvi climàtic és només un dels factors que contribueix als impactes sobre la disponibilitat futura del recurs hídric. La modelització integral mitjançant WEAP ha permès alhora entendre la interrelació d'aquest factor amb altres dinàmiques com les del canvi de l'ús del sòl o l'evolució de variables socioeconòmiques (Ahmad i Simonovic, 2004; Grouillet, Fabre, Ruelland i Dezetter, 2015). Per tant, aquesta recerca mostra que el recurs hídric presentarà canvis no només tenint en compte els canvis en el clima si no també en altres variables com els usos del sòl, el creixement de la població o del turisme, la fabricació de neu artificial i aquests influiran en les decisions per a una bona planificació del recurs hídric en la mateixa línia que el que es comenta en l'estudi de García-Ruiz et al. (2011a).

D'altra banda, els resultats han permès contrastar i posar evidències científiques objectives a algunes percepcions i estimacions de diferents actors així com d'una part de la ciutadania identificades en processos participatius, com per exemple, que hi haurà possibles conflictes en els usos de l'aigua o quins seran els sectors més cabdals a gestionar.

El primer procés participatiu d'adaptació al Canvi climàtic (PAAC) que va realitzar el Govern d'Andorra va identificar entre diferents actors del territori els impactes esperats sobre el recurs hídric. Els actors consultats afirmen que esperen una disminució del recurs, l'augment del dèficit hídric i de sequera i els conflictes per als diferents usos de

l'aigua. Tal i com s'ha comentat en anteriors paràgrafs, aquesta recerca ha permès identificar escenaris en els quals seria més probable que es complissin aquestes hipòtesis o percepcions. D'altra banda, els actors identifiquen els sectors agro-ramader, el sector turístic d'hivern, el sector de les hidroelèctriques com els més vulnerables. Els resultats obtinguts, mostren com el sector turístic és un dels que més incidència i vulnerabilitat presenten. El primer, donat el pes en el model turístic i la intensitat en el consum de recurs hídric del mateix, és un dels principals factors d'increment de demanda en la majoria d'escenaris alhora que un dels principals sectors que es pot veure afectat si són necessàries prioritzacions en moments de demanda no satisfeta, especialment els mesos d'hivern i estiu.

Pel que fa a les estratègies d'adaptació, els enquestats consideren prioritàries la majoria de les mesures proposades, les que consideren més necessàries són reduir les pèrdues d'aigua a la xarxa, fomentar l'estalvi en tots els sectors, limitar el creixement urbà i fomentar l'educació sobre el canvi climàtic i el recurs hídric. Una dada sorprenent és que no es considera prioritari tenir més informació sobre el consum d'aigua domèstic.

En base als resultats i la percepció social captada, tant d'experts com de la població en general, en el marc de la tesi, s'ha realitzat un compendi de mesures prioritàries en funció de la seva incidència per poder realitzar una estratègia integral de gestió sostenible del recurs hídric que permeti una major resiliència enfront els impactes esperats del canvi climàtic i el canvi global.

1. Millora de la infraestructura de captació, emmagatzematge i distribució del recurs hídric.

La situació geogràfica d'Andorra, a capçalera de conca en zona muntanyosa i amb innivació permanent a gran part de les cotes entre els mesos de novembre i abril, fa que la disponibilitat global del recurs hídric sigui significativa i pugui permetre la hipotètica capacitat de cobrir demandes futures en escenaris de creixement i poca eficiència. No obstant, la capacitat actual de captació i distribució no seria suficient per alguns d'aquests escenaris més continuïstes i de creixement combinats amb un impacte negatiu del canvi climàtic en els escenaris més extrems. Una primera mesura és l'increment

d'aquesta capacitat per contrarestar la possible reducció de recurs hídric tot i que la seva sostenibilitat o límit vindria supeditada als costos econòmics d'inversió i de manteniment de dita infraestructura. Tot i això, una acció imperativa és la de millorar la monitorització continua d'aquestes captacions així com la seva distribució i consum per poder tenir millor coneixement de les despeses sectorials i l'eficiència de la xarxa ja que en molts punts o usos de l'aigua no es coneixen amb detall, fet que complica la seva gestió sostenible en tot moment. L'altra acció prioritària i que en els models es mostra cabdal per evitar arribar a alguns escenaris amb demanda no coberta és millorar l'eficiència de la xarxa de captació i distribució, especialment per reduir les pèrdues d'aigua. L'escenari eficient, que contempla una reducció d'aquestes pèrdues permet contrarestar i fer front a algunes tendències de creixement de la demanda així com de disminució del recurs i maximitzar els escenaris on s'assoleix una resiliència del sistema recurs-demanda a Andorra. Una altra mesura que seria eficient seria la de disposar algunes infraestructures i tecnologies per emmagatzemar de forma adequada l'aigua disponible durant els períodes amb suficient recurs com pot ser durant la primavera quan es dona la fosa de la neu i poder distribuir aquesta aigua durant els períodes més crítics de forta demanda. Remarcant que aquestes infraestructures es refereixen no a grans embassaments i infraestructures sinó petits sistemes ambientalment integrats i basats en l'ecodisseny amb una menor capacitat però un impacte ambiental també menor.

## 2. Sistema integral de monitorització i priorització dels consums

Una bon coneixement i monitorització de les captacions i els consums sectorials permetria la posada en operativa d'un sistema integral i de control i de previsió per la gestió del recurs i la demanda. Aquest sistema permetria en base a les previsions ja sigui per variables de freqüentació turística, de població flotant, de producció agrícola, de gestió energètica i meteorològica balancejar i prioritzar de forma justa i equitativa en tot moment el usos de l'aigua per gestionar de forma eficient els possibles conflictes o demandes no cobertes inclús a l'avança. Aquest sistema hauria d'anar idealment acompanyat d'una regulació que pogués consensuar socialment els rangs de priorització i gestió d'aquest sistema amb els diferents actors.

### 3. Fomentar la consciència a l'educació sobre canvi climàtic i el recurs hídric

Tot i que és una mesura aparentment obvia, en el marc de la tesi s'ha identificat que el desconeixement de la societat sobre el nivell de consum o inclús de despesa anual d'aigua domèstica de la població és alarmantment elevat. Aquest desconeixement porta a una dificultat de poder ser conscient de la necessitat d'una racionalització i un increment en la gestió eficient del recurs hídric. La percepció és que el recurs es veurà afectat tot i que no hi ha una percepció general de la urgència d'actuar enfront aquest tema. Fomentar una educació sobre l'actual ús de l'aigua i com els efectes del canvi climàtic i el canvi global poden afectar al recurs hídric pot ajudar a entendre i acceptar la necessitat d'implementar mesures per tal de minimitzar els impactes. Així ho ha demostrat la percepció dels enquestats que creuen en la importància d'estar ben informats i que consta de les mesures que consideren prioritàries.

### 4. Desplegament de comptadors individualitzats amb facturació detallada, per trams, informativa i amb recomanacions

A nivell de la demanda domèstica, per a poder fomentar un estalvi d'aigua s'hauria de reflexionar sobre el fet que cada consumidor disposi d'una factura amb el consum d'aigua mensual o trimestral i el preu. En l'actualitat hi ha un desconeixement total tant del preu de l'aigua com del consum individual que se'n fa el que dificulta la incorporació de canvis en el comportament i bons hàbits d'eficiència i de reducció de la despesa d'aigua. Això implicaria disposar de comptadors individuals per a cada usuari ja que en l'actualitat en molts edificis plurivivenda es monitoritza el consum amb un únic comptador el que impossibilita aquest nivell de segregació per nucli de convivència a diferència del que passa amb l'energia. Aquesta infraestructura permetria per una banda, poder monitoritzar en detall cada llar i realitzar facturacions per trams per tal de penalitzar consums elevats per habitant. D'altra banda, enviar factures amb el detall dels consums i amb informació de sensibilització i recomanacions per fomentar els bons hàbits per un consum més eficient i responsable del recurs hídric a les cases així com de dispositius tècnics que permeten la racionalització de la despesa.

## 5. Racionalització i millora de l'eficiència de les infraestructures turístiques

Existeixen una sèrie d'exemples de mesures d'estalvi d'aigua i d'eficiència de gestió del recurs, que s'han modelitzat en l'escenari eficient i que podrien aplicar-se en el sector turístic d'Andorra. Entre aquestes mesures trobem la recollida d'aigües pluvials, el reciclatge d'aigües residuals o altres mesures que requereixen poca inversió i menys coneixements tècnics com per exemple, l'ús generalitzat d'accessoris per aixetes i dutxes (Barnard, Darkins, Earl i Adeyeye, 2014). La intensitat de consum de recurs hídric del turista és sensiblement superior a la del domèstic principalment per l'ús d'altres infraestructures turístiques associades com poden ser piscines i spa's. Aquestes mesures prèviament citades haurien d'anar acompanyades de mesures de sensibilització del consum del turisme i de recomanacions i incentius per racionalitzar la seva despesa ja que aquestes tindran també un impacte econòmic positiu sobre el gestor de la infraestructura turística.

Per tal d'adaptar-se als canvis inevitables en la disponibilitat d'aigua, així com per mitigar la pròpia contribució al canvi climàtic i la seva pressió sobre el recurs hídric limitat, el turisme necessita gestionar els serveis de l'aigua, centrant-se en la política (compliment dels objectius de reducció de gasos d'efecte hivernacle, els codis de construcció, mesurament i cobrament del consum d'aigua), la gestió (incloent mesures per reduir l'ús d'aigua, tractar les aigües residuals i la reutilització d'aigua), la investigació i el desenvolupament (posar en pràctica el reciclatge d'aigües residuals i reutilització), així com l'educació i el canvi de comportament per animar els turistes i el personal a participar en les mesures d'estalvi d'aigua.

## 6. Incrementar l'eficiència de la gestió de la neu de cultiu en les estacions d'esquí

Un dels factors identificats en el marc d'aquest treball que més poden arribar a comprometre la resiliència futura és la interacció entre els efectes de la reducció del canvi climàtic en la innivació natural en les estacions d'esquí i l'augment de la producció de neu de cultiu per contrarestar aquest efecte. Es preveu que aquesta dinàmica s'accentui durant els propers anys especialment en estacions com les

d'Andorra de baixa o mitjana vulnerabilitat on la gestió més eficient de la neu de cultiu pot resultar a curt i mig termini relativament eficaç per pal·liar la variabilitat climàtica. Aquest fet obliga a posar especial èmfasi en la gestió eficient del recurs nival i en conseqüència del recurs hídric necessari per a la producció de neu de cultiu. La recerca i implementació de tècniques, tecnologies i hàbits que permetin una gestió més eficient i racionalitzada del recurs hídric serà cabdal no només per una major resiliència climàtica de les estacions d'esquí sinó també per una gestió sostenible global del recurs hídric al país. En aquest sentit, en el marc del projecte PIRAGUA prèviament mencionat en altres capítols, s'està treballant en un cas d'estudi que pretén profunditzar en les mesures d'aquest tipus testejant en mode pilot nous sistemes de mesura dels gruixos de neu i de l'ús d'energia i aigua dels canons de neu per dissenyar sistemes que racionalitzin i optimitzin aquest recurs neu i en conseqüència l'ús d'aigua en estacions d'esquí.

## 7. Incrementar la fracció de zones forestals gestionades

La modelització i l'anàlisi de l'impacte dels canvis dels usos del sòl han permès identificar que l'increment de zones forestals gestionades, és a dir, amb tractaments periòdics de neteja i sanejament del bosc, permet contrarestar la disminució del cabal hídric en aquestes zones a conseqüència del canvi climàtic. Per exemple, una gestió del 50 % del territori forestal permet incrementar un 4,5 % el recurs hídric disponible. Per tant, incrementar la capacitat de gestionar les zones forestals es presenta no només com a una mesura efectiva per adaptar-se als efectes del canvi climàtic sobre el recurs hídric en zones de muntanya sinó també com a necessària ja que no fer-ho i deixar un creixement de massa forestal no controlada, tal i com és tendència en la gran part de zones de muntanya els darrers decennis, té un efecte multiplicador en la reducció projectada de cabal en un 8,5%.

Aquestes mesures, amb una continuïtat de les diferents línies de treball identificades per tal de poder millorar el coneixement més acurat dels factors i les dinàmiques estudiades en el marc d'aquesta tesi, permetrien posar la base d'un model de gestió sostenible de l'aigua a Andorra que no només permetria una millor adaptació als futurs efectes del



canvi climàtic sinó una major resiliència enfront el canvi global que es projecta en les properes dècades.

## 7.2. Conclusions

A Andorra, la confluència del canvi climàtic i un model socioeconòmic amb un pes important de la indústria turística basada en un ús intensiu de l'aigua podria comprometre la sostenibilitat futura del recurs hídric.

Aquesta recerca presenta mitjançant el model WEAP-Andorra una estimació inicial de la demanda nacional d'aigua segregada en els principals consumidors d'aigua del país i explora l'evolució futura del recurs hídric combinant escenaris climàtics i d'usos del sòl amb escenaris socioeconòmics com l'evolució de la població, el turisme, els patrons de consum i la producció de neu artificial.

El Govern d'Andorra estima el recurs hídric mitjà anual disponible a 262 hm<sup>3</sup>/any (1971-2000). Quan analitzem els cabals observats a Andorra, aquests indiquen un comportament típic de zones de muntanya mostrant una forta estacionalitat amb pics durant la primavera a causa de la fusió de la neu i elevades precipitacions. L'anàlisi de les tendències de la mitjana dels cabals anuals observats per a diferents estacions properes a Andorra mostren que existeixen poques tendències estadísticament significatives, contràriament a quan l'anàlisi es realitza mensualment on algunes de les estacions presenten tendències més significatives. Per exemple, s'observen reduccions del 50 % del cabal durant el període 1960-2019 i entre l'1 % i el 10 % de disminució del cabal per decenni. La majoria de tendències significatives de disminució dels cabals se centren en els mesos d'octubre i de maig a setembre. En el cas d'Andorra, a excepció de l'estació d'aforament del Pont d'Escaldes (augment de cabal del 29 % anuals al febrer i 0,9 % a l'abril) no existeix cap tendència estadísticament significativa quan analitzem la mitjana dels cabals. Aquest fet és degut probablement a que les sèries que disposem són molt curtes. Tanmateix les dues estacions d'aforament d'Andorra donen valors positius de tendències de cabal que corroboren que els últims anys no han sigut molt secs. Aquestes tendències que resulten significatives també s'observen durant els mesos de desembre a abril en estacions d'aforament properes a Andorra.

D'altra banda, s'analitzen les projeccions futures del canvi climàtic i usos del sòl del recurs hídric d'Andorra amb el model RHESSys. Els resultats de les simulacions del cabal per als diferents escenaris climàtics preveuen una disminució del cabal mig anual de 8,5 %, 14 %, 36 % i 40,5 % pels escenaris t2p0, t4p0, t2p-20 i t4p-20 i un augment del cabal de 24 % i 16 % pels escenaris t2p20 i t4p20, essent el valor després de *t* i *p* el canvi projectat en la temperatura mitjana i la precipitació respectivament. La majoria d'escenaris utilitzats amb l'anàlisi de sensibilitat climàtica i d'usos del sòl projecten una disminució del cabal més important durant la primavera i un avançament temporal del pic de cabal màxim del mes de juny al mes de maig degut a la fosa prematura de la coberta permanent de neu. De la mateixa manera tots els escenaris experimenten lleugers augments de cabal durant els mesos d'hivern, principalment pels efectes dels canvis de la temperatura en la dinàmica nival. Quan s'analitzen els efectes en el cabal als canvis en els usos del sòl aquests són menys significatius. Pels escenaris AFOR+t2p0 (tendència on la zona forestal no tractada guanya terreny a prats i pastures), FIREFOR+t2p0 (es produeixen incendis degut a l'abandonament de la gestió) i MANAGEFOR+t2p0 (s'incrementa la fracció de bosc gestionat) el cabal disminuirà un 8,5 %, un 4,6 % i un 4 % respectivament. L'efecte de la revegetació on el bosc guanya terreny (AFOR) es presenta com el més negatiu ja que intensifica els efectes del canvi climàtic en la reducció dels cabals disponibles. Per contra, l'escenari de gestió forestal es mostra com a una mesura per a contrarestar els efectes del canvi climàtic i permet mitigar una part de la reducció dels cabals.

La caracterització de la demanda d'aigua a Andorra ha permès veure que les dades que es disposen difereixen molt entre les parròquies. Aquestes demandes es classifiquen segons si es tracta de despesa domèstica, hotels, agrícola i ramadera, professional, producció de neu o hidroelèctrica. Tot i així, no totes les parròquies tenen diferenciats els consums segons els diferents usos, algunes comptabilitzen únicament un total de consum i altres associen al domèstic el consum dels hotels o tenen ben diferenciats els diferents usos de l'aigua. Una uniformització de les dades i una base de dades on es puguin consultar les mateixes ajudaria a la anàlisi de la demanda d'aigua a Andorra. Remarcar que el turisme juga un paper molt important a Andorra i conseqüentment en el consum d'aigua, principalment el vinculat a l'esquí, per tant, poder disposar de dades

de consums d'aigua en el sector turístic seria necessari per afinar els resultats d'aquesta recerca i poder establir millors estratègies d'adaptació.

Posteriorment s'han utilitzat les sortides del model RHESys amb les projeccions de variació del cabal segons els canvis en el clima i els usos del sòl per alimentar el model WEAP i poder avaluar les relacions entre la demanda i la disponibilitat d'aigua d'Andorra sota els diferents escenaris climàtics i d'usos del sòl i els possibles canvis socioeconòmics futurs (escenari de Continuïtat o BAU, Decreixement, Futur Creixement de la producció de neu artificial i Eficient). A escala global es pot afirmar que en l'actualitat es disposa de suficient recurs hídric per fer front a les diferents demandes. No obstant, en certs períodes de l'any i en determinades ubicacions les diferents demandes poden entrar en conflicte amb la disponibilitat del recurs. En la Conca del Valira del Nord es satisfaran quasi totes les demandes sota els diferents escenaris tot i que presentarà algunes situacions conflictives sobretot durant l'estiu quan es considera un augment de la temperatura de 4°C. Els escenaris que porten a més tensions en la disponibilitat i ús de l'aigua són els escenaris de continuïtat (segueix la tendència actual) i l'escenari de major necessitat de neu de cultiu a les estacions d'esquí per mitigar els efectes de la reducció en la innivació. La Conca del Valira d'Orient és la que presenta més conflictes possiblement per la competència entre les diferents demandes tant quan la temperatura augmenta 4°C com 2°C (major pes i intensitat del sector turístic i especialment durant els mesos d'hivern).

El model WEAP ha permès avaluar les situacions crítiques i definir i proposar una sèrie de mesures d'adaptació per mitigar els impactes del canvi climàtic i del canvi global sobre el recurs hídric, per tant, es corrobora la hipòtesis plantejada en un inici on la confluència del canvi climàtic i els canvis socioeconòmics poden arribar a donar tensions entre els diferents usos de l'aigua en moments determinats si no s'actua amb antelació. S'han identificat accions tant a nivell de les administracions públiques, del sector turístic com mesures per fomentar el canvi d'hàbits de la població i dels visitants. Cal també fomentar la recerca per conèixer, gestionar i preservar millor el recurs i la demanda hídrica. A Andorra s'ha dut a terme un procés participatiu (PAAC) des del Govern d'Andorra i amb diferents actors del país sobre els impactes esperats sobre el recurs hídric i n'afirmen una disminució del recurs tant en quantitat com en qualitat,

una pujada de la cota de neu, una disminució de la quantitat i el volum d'aigua emmagatzemada en forma de neu i diferents conflictes entre els usos de l'aigua. Aquests actors identifiquen també sectors com l'agroramader, l'hidroelèctric o el sector turístic com els més vulnerables. En el marc d'aquesta recerca s'ha realitzat una enquesta per confirmar aquesta primera visió però també fer participar tot tipus d'actor ja siguin experts com la població en general i veure la percepció de la població enfront el canvi climàtic i la gestió del recurs hídric. Aquests perceben el sector domèstic i dels serveis com màxims consumidors d'aigua. Aquesta enquesta també a ajudat a confirmar que la població té un desconeixement en el que consumeix i paga per l'aigua, això es degut a que a Andorra l'usuari final no rep cap tipus de factura ni informació. Per tant, i per a poder incentivar la gent a disminuir el seu consum d'aigua aquest punt s'hauria d'estudiar més en detall amb els diferents organismes competents del país per a que els usuaris disposin d'informació suficient per a poder promoure aquest incentiu de reducció de consum d'aigua. Les estratègies d'adaptació que els enquestats consideren més necessàries són reduir les pèrdues d'aigua a la xarxa, fomentar l'estalvi en tots els sectors, limitar el creixement urbà i fomentar l'educació sobre el canvi climàtic i el recurs hídric.

El model WEAP-Andorra es demostra com una eina útil per donar suport a la gestió, la presa de decisions i el disseny de polítiques de gestió sostenible de l'aigua i d'adaptació al canvi climàtic. Per tant, la recerca ha permès realitzar una sèrie de recomanacions i de mesures per gestionar de manera més sostenible el recurs hídric enfront els impactes del canvi climàtic i global i assentar les bases d'un full de ruta amb les línies de treball futur a desenvolupar per abordar aquesta problemàtica a Andorra de forma acurada i continuada.

### **7.3. Futures línies de recerca i desenvolupament**

Aquesta tesi ha permès realitzar la primera anàlisi científica sobre la sostenibilitat del recurs hídric a Andorra i els possibles efectes futurs del canvi climàtic i el canvi global. El fet que no hi hagi cap estudi científic precedent ha fet que la tesi hagi obert camí per primer cop en la recollida i generació d'algunes dades en aquest àmbit així com en la modelització i l'estudi dels factors i les dinàmiques que l'afecten. Per tal de

poder millorar la precisió i l'abast dels resultats i l'impacte de la metodologia proposada, durant la tesi s'han identificat diferents línies futures de treball i de recerca que permetran aquesta millora continua i una transferència de la recerca realitzada amb un major impacte sobre els actors del territori encarregats de la gestió del recurs hídric i de les polítiques d'adaptació al canvi climàtic. Les futures línies de treball seran les següents:

- Sistematització i homogeneïtzació de la recollida de dades sobre el recurs hídric i la demanda

La disponibilitat de dades històriques de consums segons els diferents usos és limitada a Andorra i no és uniforme per a totes les parròquies. Una línia de treball seria la del disseny d'un marc d'indicadors i d'informació detallat i estandarditzat dels consums totals i sectorials per cada parròquia. D'altra banda, la informació disponible sobre els consums del sector turístic també és limitada i amb poca granularitat. Aquesta millora permetria augmentar el detall del model de demanda i, per tant, poder afinar molt més tant geogràficament com temporalment les projeccions futures de la demanda i les possibles tensions en els usos així com dissenyar esquemes detallats de priorització.

En la mateixa línia, les fonts de dades històriques sobre recurs hídric són de poca durada, discontinua i no estandarditzada. La mateixa sistematització i homogeneïtzació a escala de país, possible per les nostres dimensions i la proximitat entre les institucions, permetria una correcta i acurada caracterització del recurs ja sigui per poder millorar les sèries que ens permeten analitzar les tendències de canvi climàtic com per alimentar amb dades més acurades els models hidrològics. D'aquí la importància de disposar de més estacions d'aforament a Andorra per permetre aquesta anàlisi de tendències climàtiques en un futur i l'obtenció de bones dades i ben distribuïdes espacialment per la modelització.

- Enllaç del model WEAP amb el model energètic LEAP

Una de les línies de desenvolupament futur serà el d'enllaçar el model WEAP amb el model LEAP-Andorra desenvolupat en la tesis doctoral de l'Oriol Travesset (Travesset-

Baró, 2017). El model LEAP (Low Emissions Analysis Platform) és una eina de programari utilitzada per a l'anàlisi de polítiques energètiques i d'avaluació de la mitigació del canvi climàtic desenvolupada per l'Institut de Medi Ambient d'Estocolm (SEI). Aquests dos models poden enllaçar-se per efectuar una anàlisi entre el recurs hídic i les retroalimentacions amb el model energètic com per exemple per a treballar escenaris sobre la producció d'energia hidroelèctrica en els dos models.

- Disseny participatiu de les estratègies d'adaptació i de gestió sostenible del recurs hídic

En el marc de la tesi estava previst una interacció de sessions participatives amb diferents actors del sector de l'aigua per tal de poder discutir els resultats i la seva interpretació i complementar la informació extreta. Això amb l'objectiu de reforçar les mesures proposades, considerar les mesures més adients i prioritàries per una adaptació als impactes del canvi climàtic i una gestió sostenible del recurs hídic. La situació sanitària derivada de la crisi de la COVID-19 no ha permès poder desenvolupar aquestes dinàmiques en el marc de la tesi i la voluntat serà poder realitzar-les en un futur en funció de l'evolució de la pandèmia.

- Millorar el coneixement sobre la interacció entre les dinàmiques nivals i les dinàmiques del recurs hídic

Com a zona característica de muntanya, la dinàmica fluvial d'Andorra va estretament lligada i marcada per la dinàmica nival, la qual a la vegada estarà fortament influenciada per l'evolució futura del clima. Poder aprofundir en el coneixement d'aquestes dinàmiques és cabdal per poder afinar millor en les projeccions de com el canvi climàtic afectarà al recurs hídic d'Andorra. En el marc de la tesi es va començar a monitoritzar la conca de Sorteny (Ordino) a nivell nivometeorològic i de propietats del cabal. No obstant, donada la temporalitat de la tesi, encara no s'ha pogut extreure resultats i conclusions suficients per poder contribuir i emmarcar aquest aspecte en la tesi. No obstant, aquesta serà una línia prioritària de treball futur.

- Disseminació, transferència i publicació de la tesi

Finalment, els resultats obtinguts al llarg de la tesi es treballaran per tal de poder fer transferència del nou coneixement generat tant a l'administració pública, com per exemple l'Oficina de l'Energia i del Canvi Climàtic del Ministeri de Medi Ambient i el Departament d'Aigües, amb qui s'ha treballat de forma estreta, així com amb el teixit educatiu a través dels marcs formatius amb les escoles amb el Centre d'Estudis de la Neu i de la Muntanya d'Andorra. S'està treballant en la publicació de com a mínim dos articles científics en revistes indexades. Un primer sobre l'evolució i les projeccions dels efectes del canvi climàtic sobre el recurs hídric a Andorra i un segon sobre la modelització integral amb el model WEAP-Andorra i la projecció d'escenaris d'evolució futura del recurs i la demanda i les possibles tensions en la gestió de l'aigua.

#### 7.4. Referències

- Ahmad, S., & Simonovic, S. P. (2004). Spatial system dynamics: new approach for simulation of water resources systems. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 18(4), 331–340.
- Alpert, P., Krichak, S. O., Shafir, H., Haim, D., & Osetinsky, I. (2008). Climatic trends to extremes employing regional modeling and statistical interpretation over the E. Mediterranean. *Global and Planetary Change*, 63(2), 163–170. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2008.03.003>
- Barnard, P., Darkins, T., Earl, B., & Adeyeye, K. (2014). Retrofitting for water efficiency : A hotel case study. *Proceedings of the Water Efficiency Conference*, 29–38.
- García-Ruiz, J. M., & Lana-Renault, N. (2011b). Hydrological and erosive consequences of farmland abandonment in Europe, with special reference to the Mediterranean region – A review. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.01.003>
- García-Ruiz, J. M., López-Moreno, J. I., Vicente-Serrano, S. M., Lasanta-Martínez, T., & Beguería, S. (2011a). Mediterranean water resources in a global change scenario. *Earth-Science Reviews*, 105(3–4), 121–139. <https://doi.org/10.1016/J.EARSCIREV.2011.01.006>
- Grouillet, B., Fabre, J., Ruelland, D., & Dezetter, A. (2015). Historical reconstruction and

- 2050 projections of water demand under anthropogenic and climate changes in two contrasted Mediterranean catchments. *Journal of Hydrology*. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.01.029>
- Lespinas, F., Ludwig, W., & Heussner, S. (2010). Impact of recent climate change on the hydrology of coastal Mediterranean rivers in Southern France. *Climatic Change*, 99(3), 425–456. <https://doi.org/10.1007/s10584-009-9668-1>
- López-Moreno, J. I., Beniston, M., & García-Ruiz, J. M. (2008). Environmental change and water management in the Pyrenees: Facts and future perspectives for Mediterranean mountains. *Global and Planetary Change*. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.10.004>
- López-Moreno, J. I., & García-Ruiz, J. M. (2004). Influence of snow accumulation and snowmelt on streamflow in the central Spanish Pyrenees / Influence de l'accumulation et de la fonte de la neige sur les écoulements dans les Pyrénées centrales espagnoles. *Hydrological Sciences Journal*, 49(5). <https://doi.org/10.1623/hysj.49.5.787.55135>
- López-Moreno, J. I., Vicente-Serrano, S. M., Moran-Tejeda, E., Zabalza, J., Lorenzo-Lacruz, J., & García-Ruiz, J. M. (2011). Impact of climate evolution and land use changes on water yield in the Ebro basin. *Hydrology and Earth System Sciences*. Katlenburg-Lindau: Copernicus GmbH. <https://doi.org/10.5194/hess-15-311-2011>
- López-Moreno, J. I., Zabalza, J., Vicente-Serrano, S. M., Revuelto, J., Gilaberte, M., Azorin-Molina, C., Morán-Tejeda, E., García-Ruiz, J. M., & Tague, C. (2014). Impact of climate and land use change on water availability and reservoir management: Scenarios in the Upper Aragón River, Spanish Pyrenees. *Science of The Total Environment*, 493, 1222–1231. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2013.09.031>
- Senatore, A., Mendicino, G., Smiatek, G., & Kunstmann, H. (2011). Regional climate change projections and hydrological impact analysis for a Mediterranean basin in Southern Italy. *Journal of Hydrology*, 399(1–2), 70–92.
- Tague, C., & Peng, H. (2013). The sensitivity of forest water use to the timing of precipitation and snowmelt recharge in the California Sierra: Implications for a warming climate. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 118(2), 875–887.
- Travesset Baró, O. (2017). Prospectiva energètica al Principat d'Andorra. Model integrat d'avaluació de la seguretat energètica per a la transició cap a un escenari sostenibilista. Universitat Politècnica de Catalunya. *TDX (Tesis Doctorals En Xarxa)*.



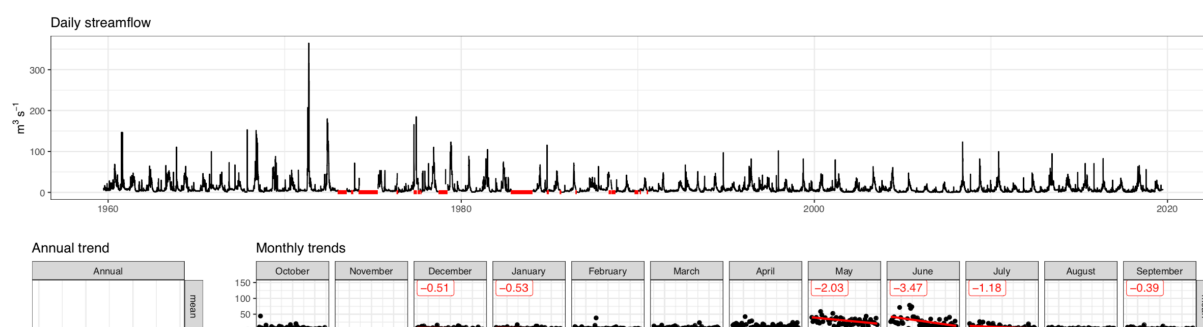
<http://www.tdx.cat/handle/10803/460913>

- Vicente-Serrano, S. M., Lasanta, T., & Romo, A. (2004). Analysis of Spatial and Temporal Evolution of Vegetation Cover in the Spanish Central Pyrenees: Role of Human Management. *Environmental Management*. New York: Springer New York. <https://doi.org/10.1007/s00267-003-0022-5>
- Vörösmarty, C. J., & Sahagian, D. (2000). Anthropogenic disturbance of the terrestrial water cycle. *Bioscience*, 50(9), 753–765.
- Warburton, M. L., Schulze, R. E., & Jewitt, G. P. W. (2012). Hydrological impacts of land use change in three diverse South African catchments. *Journal of Hydrology*. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.10.028>
- Weatherhead, E. K., & Howden, N. J. K. (2009). The relationship between land use and surface water resources in the UK. *Land Use Policy*. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2009.08.007>

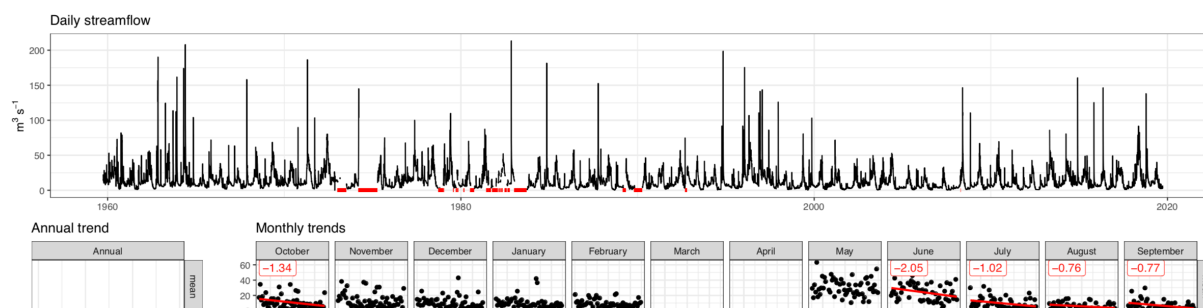
## ANNEX 1. COMPLEMENT DE L'ANÀlisi DE TENDÈNCIES DE CABALS AL PIRINEU

Hidrograma obtingut a partir de les sèries diàries de cabal de l'estació amb les dades mancants indicades en vermell. A sota s'inclou l'estadístic de la mitjana del cabal per al període seleccionat a escala anual (esquerra) i mensual (dreta) on es marca mitjançant una línia i un nombre vermell l'anàlisi de tendències i el canvi observat, respectivament, en els casos en què la tendència sigui significativa

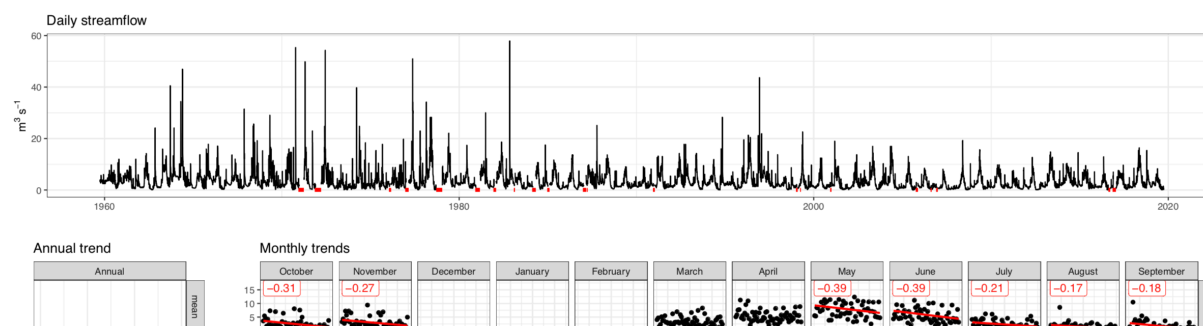
(a)



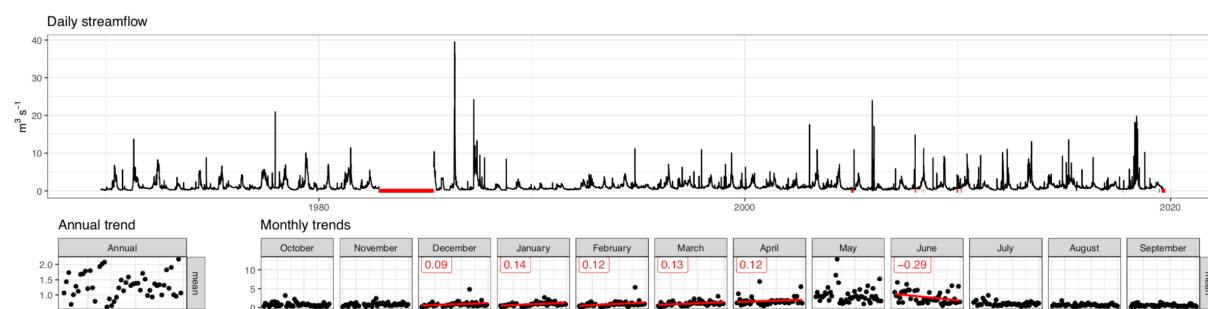
(b)



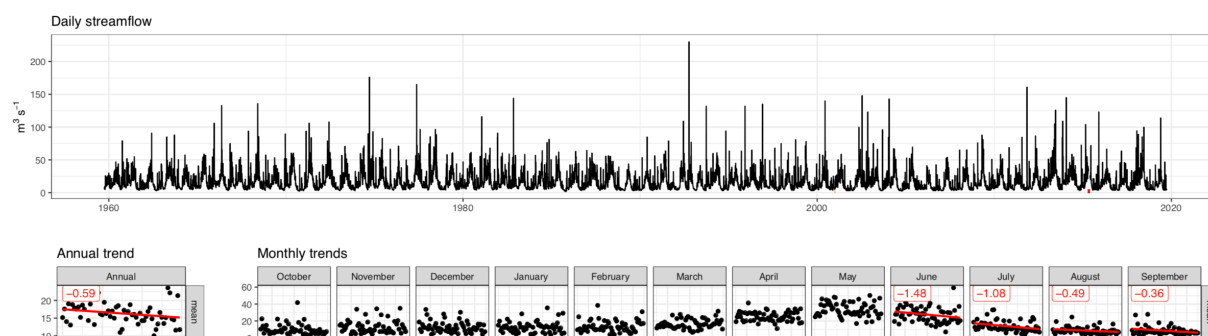
(c)



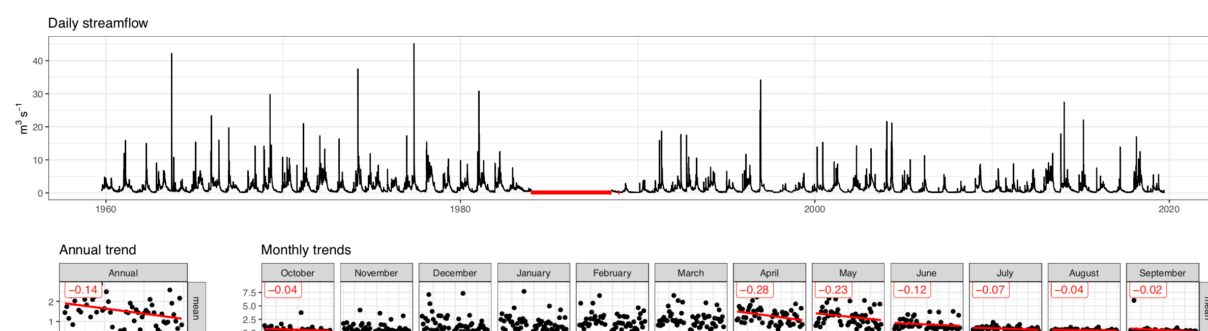
(d)



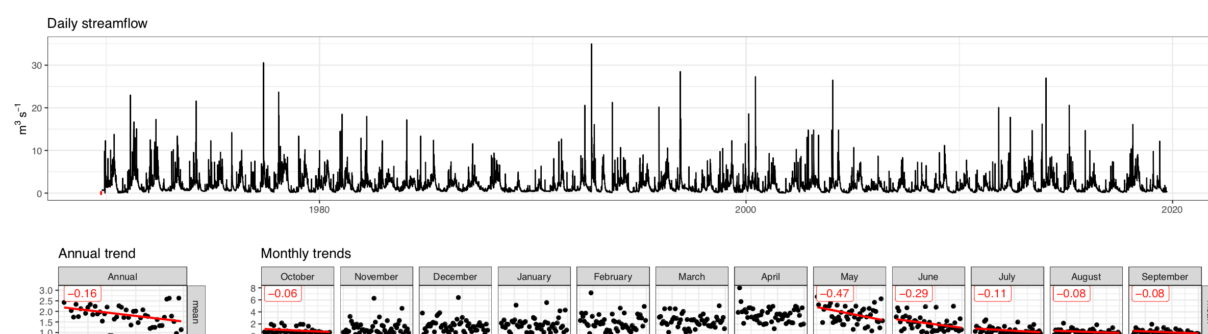
(e)



(f)



(g)



(h)

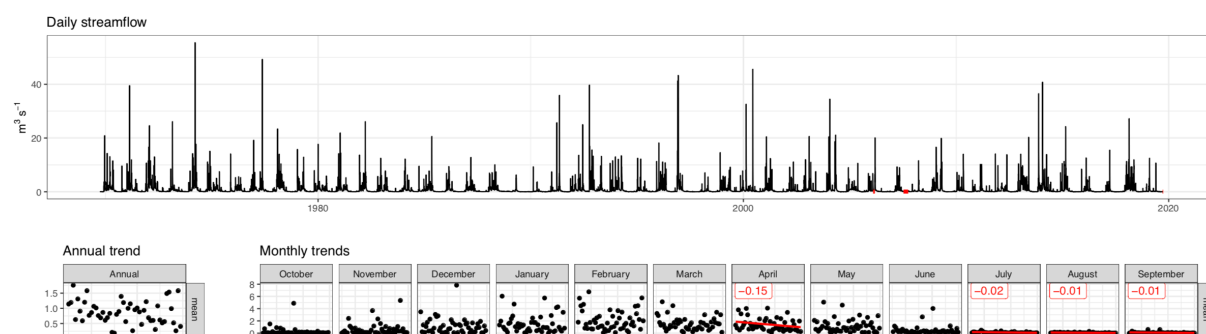


Figura 1. Representació dels resultats obtinguts per a la estació d'aforament de la (a) Seu d'Urgell (Valira), (b) Seu d'Urgell (Segre), (c) Puigcerdà (Segre), (e) Soueix-Rogalle (Le Salat), (f) Saint Martin de Lys pel període 1960-2019 i (d) Alins (Tor), (g) Lavelanet i (h) Chalabre pel període 1970-2019. (PIRAGUA (EFA210/16/PIRAGUA), 2020) .

Resultats de l'anàlisi de tendències anual i mensualment per l'estadístic mitjana per a cada estació d'aforament.

Temps	Estadístic	Seu Urgell (Valira)	Seu Urgell (Segre)	Alins (Tor)	Puigcerdà (Segre)	Soueix-Rogalle (Le Salat)	Saint Martin de Lys	Lavelanet	Chalabre
Període		1960-2019	1960-2019	1970-2019	1960-2019	1960-2019	1960-2019	1970-2019	1970-2019
Anual	sig	NA	NA	0.9787	NA	0.0092	0.016	0.0063	0.1271
Anual	trend_r	NA	NA	0.0974	NA	-0.3249	-0.743	-0.7287	-0.7437
Anual	trendd_r	NA	NA	0.9744	NA	-3.2488	-7.4303	-7.2869	-7.4369
Anual	trendp_r	NA	NA	4.7744	NA	-19.4931	-42.3525	-36.4347	-37.1847
Octubre	sig	0.0944	8,00E-04	0.0519	0.0013	0.0866	0.0115	0.0378	0.1359
Octubre	trend_r	-0.9003	-1.0776	-0.6689	-1.0342	-0.4936	-0.9241	-0.7236	-0.7332
Octubre	trendd_r	-9.0026	-10.7764	-6.6887	-10.3421	-4.9363	-9.2411	-7.2364	-7.3319
Octubre	trendp_r	-52.2149	-63.5809	-32.1055	-61.0184	-29.618	-51.7503	-36.1819	-36.6594
Novembre	sig	NA	0.0024	0.3156	0.0603	0.9583	0.0741	0.8971	0.7498
Novembre	trend_r	NA	-0.8103	0.8014	-0.7472	-0.0295	-0.8703	0.0351	0.317
Novembre	trendd_r	NA	-8.1028	8.0136	-7.4724	-0.2955	-8.7033	0.3508	3.1704
Novembre	trendp_r	NA	-47.8066	37.6641	-44.0871	-1.7727	-48.7386	1.7539	15.852
Desembre	sig	0.0106	NA	0.0189	0.0746	0.61	0.079	0.5871	0.6478
Desembre	trend_r	-0.8713	NA	1.5782	-0.8079	-0.3893	-1.1803	-0.4021	-0.4236
Desembre	trendd_r	-8.7129	NA	15.7819	-8.0795	-3.8932	-11.8028	-4.0206	-4.2355
Desembre	trendp_r	-48.7922	NA	74.175	-46.8611	-23.3591	-66.0959	-20.103	-21.1777
Gener	sig	0.044	NA	0.006	0.1795	0.9791	0.0687	0.6981	0.518
Gener	trend_r	-0.9161	NA	2.6808	-0.7699	-0.0403	-1.0706	-0.2953	-0.5478
Gener	trendd_r	-9.1608	NA	26.8082	-7.6985	-0.4029	-10.7055	-2.9534	-5.4783
Gener	trendp_r	-52.2165	NA	125.998	-44.6515	-2.4174	-58.8804	-14.7669	-27.3917
Febrer	sig	0.184	NA	0.0031	0.377	0.6378	0.4204	0.5069	0.9794
Febrer	trend_r	-0.7616	NA	2.7127	-0.6148	0.2392	-0.3493	-0.5716	-0.121
Febrer	trendd_r	-7.6159	NA	27.1274	-6.1483	2.3916	-3.4932	-5.716	-1.2098
Febrer	trendp_r	-44.1721	NA	127.498	-35.045	14.3496	-19.2125	-28.5799	-6.0491

6									
Març	sig	0.1057	0.2431	0.0209	NA	0.2777	0.3472	0.4129	0.5405
Març	trend_r	-0.5611	-0.4299	1.8904	NA	0.3561	-0.3165	-0.3452	-0.5138
Març	trendd_r	-5.6108	-4.2993	18.9038	NA	3.5606	-3.1649	-3.4518	-5.1376
Març	trendp_r	-32.5428	-25.3656	88.8477	NA	21.3635	-17.4069	-17.259	-25.6881
Abril	sig	0.4003	0.2894	0.0408	NA	0.7142	0.0262	0.33	0.0378
Abril	trend_r	-0.3606	-0.3269	0.9839	NA	-0.0205	-0.7356	-0.4077	-1.0322
Abril	trendd_r	-3.6065	-3.2687	9.8391	NA	-0.2046	-7.3555	-4.0766	-10.3222
Abril	trendp_r	-20.5569	-19.6123	46.2437	NA	-1.2278	-40.4555	-20.383	-51.6108
Maig	sig	0.0193	0.028	0.4411	0.493	0.3408	0.0489	0.0305	0.7761
Maig	trend_r	-0.5935	-0.4582	-0.3622	-0.1988	-0.1401	-0.6797	-0.9569	-0.2969
Maig	trendd_r	-5.9346	-4.5816	-3.6224	-1.9879	-1.4012	-6.7969	-9.569	-2.9692
Maig	trendp_r	-33.8273	-27.4895	-17.3875	-11.3312	-8.2671	-37.3831	-47.845	-14.8461
Juny	sig	4,00E-04	0.0065	0.0291	0.0425	0.0192	0.0025	0.0214	0.1815
Juny	trend_r	-1.1042	-0.6189	-0.9928	-0.7004	-0.4922	-0.7532	-1.1127	-0.7658
Juny	trendd_r	-11.0424	-6.1889	-9.9276	-7.0038	-4.922	-7.5319	-11.1272	-7.6585
Juny	trendp_r	-62.9419	-37.1335	-47.6524	-39.9215	-29.5318	-41.4255	-55.6358	-38.2924
Juliol	sig	0.0013	0.0134	0.4303	0.0423	0.013	0.0094	0.0048	0.011
Juliol	trend_r	-1.1335	-0.8335	-0.5575	-0.978	-0.707	-0.795	-0.964	-1.3131
Juliol	trendd_r	-11.3355	-8.3348	-5.5752	-9.7803	-7.0704	-7.9504	-9.6402	-13.1313
Juliol	trendp_r	-65.7459	-50.0091	-26.7611	-56.7257	-42.4222	-44.522	-48.201	-65.6564
Agost	sig	0.0894	0.0071	0.5091	0.0294	0.0299	0.0218	0.002	0
Agost	trend_r	-0.8172	-1.1099	-0.1627	-1.2553	-0.5121	-0.6892	-0.9526	-1.3786
Agost	trendd_r	-8.1715	-11.0988	-1.6267	-12.5532	-5.1205	-6.8923	-9.526	-13.7862
Agost	trendp_r	-45.7605	-66.593	-7.8081	-70.2977	-30.7232	-38.5969	-47.6299	-67.5524
Setembre	sig	0.0411	0.0245	0.1374	0.0163	0.0112	0.0094	0.0019	0.0017
Setembre	trend_r	-0.8816	-1.0292	-0.4524	-1.0493	-0.437	-0.5467	-1.0627	-1.128
Setembre	trendd_r	-8.8161	-10.2918	-4.524	-10.4932	-4.3699	-5.4667	-10.6265	-11.2804
Setembre	trendp_r	-50.2517	-61.7506	-21.7151	-60.8603	-26.2196	-30.6136	-53.1327	-55.2738

Taula 1. Resultats de l'anàlisi de tendències per l'estadístic "mean" calculat a escala anual i mensual per a diferents estacions d'aforament a partir de les series diàries de cabals. De color vermell es mostren les tendències significatives (PIRAGUA (EFA210/16/PIRAGUA), 2020)

## **ANNEX 2. ENQUESTA RECURS HÍDRIC I ESTRATÈGIES D'ADAPTACIÓ AL CANVI CLIMÀTIC**

---

A continuació podeu consultar les preguntes de l'enquesta realitzada a l'Octubre del 2020.

### **Dades personals**

1) Parròquia de residència?

- Canillo
- Encamp
- Ordino
- La Massana
- Andorra la Vella
- Sant Julià de Lòria
- Escaldes-Engordany

2) Edat

3) Gènere

### **Percepció del canvi climàtic**

4) Què en pensa del canvi climàtic?

- Sóc escèptic
- Tinc dubtes
- Hi crec fermament i hem d'actuar

5) Quina o quines creu que són les causes del canvi climàtic actual? (varies opcions)

- És un canvi natural
- És un canvi forçat per l'activitat humana
- No crec en el canvi climàtic

6) Quins creu que poden ser els efectes del canvi climàtic sobre el recurs hídric a Andorra? (opció totalment d'acord o totalment en desacord)

- Disminuirà el cabal dels rius
- Augmentarà el risc d'inundacions
- Augment l'altitud de la cota de neu (és a dir, menys neu a cotes baixes)
- Disminuirà la qualitat d'aigua

**Usos de l'aigua**

7) Coneix els usos de l'aigua a Andorra? (ordena 1 màxim consumidor, 5 mínim consumidor)

- Sector domèstic
- Sector serveis (hotels, comerços, restaurants, etc.)
- Agricultura
- Producció d'energia hidroelèctrica
- Producció de neu artificial

1) Coneix el preu de l'aigua consumida a casa?

- Si
- No

2) Coneix quants metres cúbics (m<sup>3</sup>) d'aigua consumeix anualment a casa?

- Si
- No

3) Coneix el preu mitjà del m<sup>3</sup> d'aigua a Andorra?

- Si
- No

4) A quin preu creu que paga el m<sup>3</sup> d'aigua consumida a Andorra?

**Estratègies d'adaptació al canvi climàtic**

5) En un hipotètic context d'escassetat d'aigua, segons la seva opinió, a quins sectors s'hauria de donar prioritat d'accés a l'aigua?

- Sector domèstic
- Sector serveis (hotels, comerços, restaurants, etc.)
- Agricultura
- Producció d'energia hidroelèctrica
- Producció de neu artificial

6) Quines de les següents mesures d'adaptació al canvi climàtic proposades considera prioritàries?

- Limitar el creixement urbà
- Fomentar la recollida d'aigües de pluja per al rec
- Reduir les pèrdues d'aigua de la xarxa i fomentar l'estalvi en tots els sectors del país

- Proporcionar major informació als usuaris sobre el consum d'aigua domèstic
- Limitar el creixement turístic
- Fomentar l'ecoturisme
- Fomentar l'educació sobre canvi climàtic i recurs hídric
- Diversificar les activitats turístiques de muntanya per ser més independents de la neu
- Incrementar el control i la informació sobre el consum d'aigua als hotels
- Promoure una gestió activa dels boscos per evitar els impactes de les sequeres estivals (incendis, malalties, etc.)
- Fomentar la construcció de preses per augmentar la capacitat d'estocatge

7) De les estratègies anteriors, seleccioni les cinc que considera més necessàries

8) Comparteixi idees d'altres possibles estratègies d'adaptació al canvi climàtic aplicables a Andorra



## PUBLICACIONS I COMUNICACIÓ CIENTÍFICA

---

Pesado, C., Travesset-Baró, O., Zabalza, J., López-Moreno, J.I. & Pons M. (2020). Sustainability of water resources in Andorra under global change: The effects of climate and socio-economic changes in the future of water resources.

<https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-10205>

Beguiría, S., Sánchez-Pérez, J. M., Antigüedad, I., Caballero, Y., Lambán, L. J., Quintana-Seguí, P., Llasat, C., Pesado, C., Vidal, J.P., Jódar, J. (2019). Evaluation of water resources of the Pyrenees in a context of climate change and adaptation strategies. *Geophysical Research Abstracts*, 21(April), DOI:10.13140/RG.2.2.11081.70242

Reynaud, A., Pons, M., & Pesado, C. (2018). Household Water Demand in Andorra: Impact of Individual Metering and Seasonality. *Water*, 10(3), 321.

<https://doi.org/10.3390/w10030321>

### **Altres comunicacions a congressos**

Pesado, C., Pons, M., Apodaka, J., Albalat, A. & López-Moreno, J.I. (2019). Influence of snowmelt on streamflow in Andorra. VII Conference of the Iberian Section of the International Permafrost Association (Jaca)

<https://ipaiberico2019.csic.es>

Pòster

Pesado, C. (2019). Evolución de los usos de los recursos hídricos y posibles tensiones bajo escenarios de cambio climático en Andorra. 3º Coloquio internacional sobre cambio climático en zonas de montaña OPCC2 2019

Comunicació oral

Pesado, C., Pons, M., López-Moreno, J.I. (2017). Impactes del canvi climàtic sobre la coberta de neu a Andorra i la seva influència sobre el recurs hídric.

V Pyrenean Symposium on snow and avalanches

Pòster

